



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 02 7575

Tópico: Aplicação de Novas Tecnologias

APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET AO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM TRÊS TERMINAIS

MURILO DA SILVA

MÁRIO OLESKOVICZ

DENIS V. COURY

EESC-USP

EESC-USP

EESC-USP

RESUMO

Este trabalho refere-se a um estudo preliminar da aplicação da Transformada Wavelet para analisar os transitórios de alta frequência gerados por uma situação de falta em um sistema de transmissão com três terminais. Esta análise tem por objetivo a determinação precisa do ponto de ocorrência da situação de falta sobre o mesmo. A metodologia de localização da falta baseia-se na teoria das ondas viajantes, onde, em função do tempo de propagação do sinal entre o ponto de falta e os terminais da linha, revelados pela transformada wavelet, pode-se estimar com precisão o ponto de ocorrência da falta. Os resultados alcançados até o momento são altamente promissores.

PALAVRAS-CHAVE

Localização de faltas, linha de transmissão com três terminais, ondas viajantes, transformada wavelet, qualidade da energia.

1.0 INTRODUÇÃO

O crescente aumento em complexidade dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), em grande parte devido à demanda de energia elétrica e a interligação dos sistemas existentes, tem exigido uma considerável melhora dos equipamentos de controle e proteção, a fim de garantir um fornecimento confiável de energia com o mais alto grau de continuidade e conformidade possível. Desta melhora do sistema como um todo, evidencia-se a possibilidade de uma rápida e precisa localização de situações faltosas, o que vem, por consequência, a reduzir o período de

interrupção do fornecimento de energia, garantindo uma operação confiável e econômica do sistema de potência. Neste sentido, o desenvolvimento de novas técnicas de localização digital de faltas para linhas de transmissão, utilizando dispositivos baseados em microprocessadores, tem sido um assunto de grande interesse para pesquisadores e engenheiros de potência nos últimos anos. Várias abordagens foram desenvolvidas e diferentes princípios já foram aplicados ao problema da localização de faltas em linhas de transmissão. Basicamente, os métodos de localização de faltas podem ser classificados em duas categorias: (a) nos métodos baseados em componentes de frequência fundamental e (b) nos métodos baseados em componentes de alta frequência gerados por uma situação de falta.

Dos estudos já realizados à proteção de linhas com três terminais [1-4], evidencia-se uma certa complexidade na tarefa de localização de uma situação faltosa. Este tipo de linha, onde um novo terminal alimentador é conectado a uma linha de transmissão já existente, oferece consideráveis vantagens econômicas e ambientais quando comparado aos sistemas de dois terminais em Extra Alta Tensão (EAT). Em contrapartida, pelas características físicas de tal modelo, este é de difícil proteção às filosofias convencionais e, por esta razão, exige uma especial atenção.

Diante do exposto, evidencia-se por este trabalho o estudo e o desenvolvimento de uma nova abordagem à localização de faltas em linhas com três terminais que, pelos resultados iniciais observados, tem correspondido satisfatoriamente aos desafios impostos por esta configuração. O

mesmo é fundamentado na teoria de ondas viajantes dispondo da Transformada Wavelet (TW). A metodologia a ser apresentada é baseada nos componentes de alta frequência dos sinais transitórios originados por uma situação de falta (ondas viajantes), registrados nos terminais de um determinado sistema de transmissão. Desta maneira, caracteriza-se via TW o tempo de viagem das ondas de tensão ou corrente provenientes do ponto de falta aos terminais da linha. Uma vez detectado os instantes de chegada das ondas nos terminais das linhas, pode-se então estimar em qual ramo da linha e a qual distância a falta ocorreu tomando-se como referência um dos terminais do sistema.

Na estrutura do presente trabalho apresentam-se, nesta ordem, apontamentos sobre a teoria da TW, o método de localização desenvolvido, testes e resultados preliminares, finalizando com algumas conclusões e observações parciais sobre o trabalho.

2.0 A TRANSFORMADA WAVELET

Conforme apresentado por Hwan e Aggarwal [5], alguns dos métodos empregados para a análise dos fenômenos transitórios no presente passam pela (i) transformação dos dados no domínio da frequência, empregando-se a análise de Fourier, Laplace ou a Transformada Z ou pelo (ii) uso de programas de simulação computacional de sistemas de energia, como o programa de transitórios eletromagnético (EMTP) e ou pelas soluções matemáticas de equações diferenciais, seja analítica ou numericamente.

A análise por Wavelet transpõe as limitações dos métodos de Fourier pelo emprego de funções de análise que são locais, ambas no tempo e na frequência. A transformada wavelet é muito bem aceita para uma ampla faixa de sinais que não são periódicos e que podem conter ambos os componentes senoidais e de impulso, como é típico nos transitórios de sistemas de potência. Em particular, temos a habilidade da Wavelet em se concentrar em pequenos intervalos de tempo, para componentes de alta frequência, e em longos intervalos de tempo, para componentes de baixa frequência. Estas características, inerentes à transformada, vêm a melhorar a análise de sinais impulsivos e que apresentem oscilações transitórias localizadas, particularmente na presença da componente fundamental e dos componentes harmônicos de baixa ordem. A TW pode ser encontrada em duas formas: (i) a Transformada Wavelet Contínua (TWC) e a Transformada Wavelet Discreta (TWD).

Uma das formas para implementação da TWD consiste no sucessivo agrupamento de pares de

filtros passa baixa e passa alta em cada estágio de escala da TW. Isto pode ser visto como sucessivas aproximações da mesma função, onde cada aproximação ressalta importantes informações relativas a uma dada escala (faixa de frequência). Este processo de filtragem é mais bem representado pela técnica da Análise Multiresolução (AMR). Tal processo baseia-se na filtragem de um sinal a ser analisado através de bancos de filtros passa alta e passa baixa, fornecendo versões do sinal original relativa aos sinais de aproximação e de detalhe. A aproximação compreende as baixas frequências do sinal original, enquanto o detalhe engloba o conteúdo de alta frequência do sinal original. Dessa forma, o sinal original é dividido em diferentes escalas de resolução caracterizando distintas faixas de frequências, como no caso da análise de Fourier. A idéia básica do processo pela AMR consiste em dividir o espectro de um dado sinal em sub-bandas de frequência e então tratar individualmente cada uma das sub-bandas, considerando o propósito desejado. Vale comentar que cada nível de decomposição conterá informações importantes em frequência e no tempo relativas ao sinal original. A Figura 1 ilustra a AMR sobre dois ciclos de um sinal senoidal, sendo, um ciclo puro e um ciclo com adição de ruído branco gaussiano.

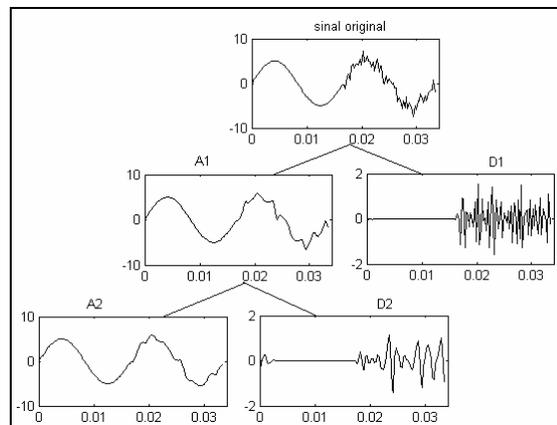


Figura 1 – Exemplo de AMR: sinal original; A1 e A2 - primeira e segunda aproximação; D1 e D2 - primeiro e segundo detalhe.

Este trabalho faz uso da técnica de AMR, onde o sinal a ser analisado é decomposto em dois níveis de resolução. Com isso, obtemos os sinais de aproximação (A1 e A2) e de detalhe (D1 e D2) relativos ao sinal original. Analisando o sinal de detalhe 2, o qual representa uma faixa de alta frequência do sinal em análise, o mesmo será capaz de revelar o instante de chegada da primeira onda nos três terminais da linha.

Neste trabalho optou-se pelo uso da wavelet-mãe symlet 3 (sym3), por melhor representar o problema a ser delineado.

3.0 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A princípio, para efeito ilustrativo, será considerado um sistema de transmissão monofásico com comprimento l , conectado entre duas fontes e o seu respectivo diagrama de Lattice., como ilustrado na Figura 2, Na ocorrência de uma falta a uma distância d da barra A, baseado na teoria das ondas viajantes [6], esta produz ondas de tensão que se propagam ao longo da linha em ambas as direções, a partir do ponto de ocorrência da falta. Ao encontrar uma descontinuidade, essas ondas se refletem e retornam ao ponto da falta onde haverá novas reflexões e assim, sucessivamente, até ser alcançado o estado permanente de falta. Os transitórios de falta registrados nos terminais da linha conterão abruptas mudanças em intervalos comensuráveis com o tempo de excursão dos sinais entre o ponto de falta e os terminais. Determinando-se o intervalo de tempo dos sinais entre o ponto de falta e os terminais e, usando a velocidade de propagação das ondas v , a qual é função dos parâmetros da linha em questão, a distância da falta pode ser facilmente estimada, conforme a equação (1):

$$d = \frac{l - v \cdot (t_b - t_a)}{2} \quad (1)$$

onde: v é a velocidade de propagação da onda na linha e t_a e t_b são os tempos de chegada da primeira onda em ambos os terminais A e B, respectivamente.

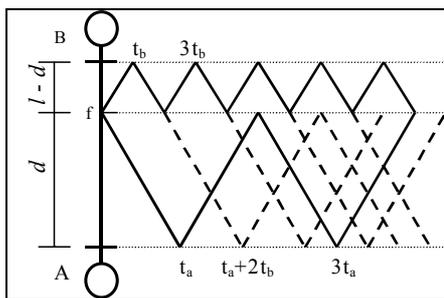


Figura 2 - Diagrama de Lattice para uma falta qualquer

Em se tratando de um sistema trifásico, as fases são mutuamente acopladas e, por conseguinte, as perturbações de alta frequência geradas durante uma falta podem também aparecer nas fases não faltosas. Portanto, para implementar o método das ondas viajantes em sistemas trifásicos, os sinais no domínio do tempo são primeiramente decompostos em seus

componentes modais. Considerando que as linhas de transmissão sejam transpostas, podem ser utilizadas as transformações modais de Clarke ou de Wedepohl. Neste trabalho foi utilizada a matriz de transformação de Clarke [7]. Os sinais de fase (tensão e ou corrente) são transformados em seus componentes modais pelo uso da matriz de transformação. A transformação modal permite que o sistema trifásico seja tratado como um sistema com três circuitos monofásicos de forma independente. Os valores de fase são transformados em três modos desacoplados: um modo terra (modo 0) e dois modos aéreos (modo 1 e modo 2). Como o modo aéreo 1 (modo 1) se faz presente em qualquer tipo de falta, o problema de localização de faltas é formulado considerando apenas os sinais deste modo, simplificando o mesmo.

3.1 Metodologia de localização de faltas para um sistema com três terminais

O método proposto trabalha com os sinais faltosos de corrente e ou tensão registrados simultaneamente em ambos os terminais da linha. O método não requer que a falta seja classificada. Todavia, o mesmo implica na necessidade de que haja um meio de comunicação entre os três terminais para transmissão dos dados, a qual pode ser feita, por exemplo, por cabos OPGW (*Optical Ground Wire*), como apresentado em [8]. Além disso, a utilização desta técnica também implica na necessidade de sincronização dos dados registrados nos terminais, a qual pode ser feita por GPS (*Global Positioning System*), como referenciado em [9]. No que segue, as formas de ondas registradas e sincronizadas devem ser transformadas em seus componentes modais. Deste ponto, os sinais do modo aéreo 1 são decompostos em dois níveis de resolução por meio da AMR usando a TW. Pela análise dos sinais de detalhe 2 (D2) é possível se determinar o tempo de chegada da primeira onda nos três terminais do sistema, denominados aqui por t_a , t_b e t_c , conforme ilustra a Figura 3.

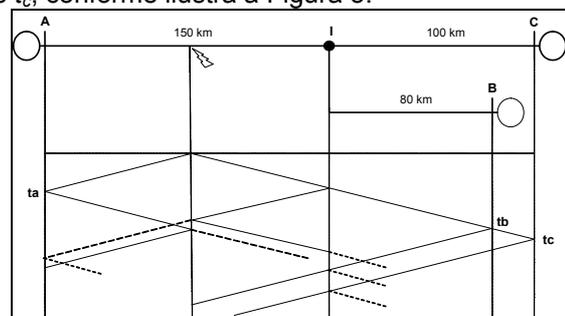


Figura 3 – Diagrama de Lattice para uma linha com três terminais

Uma vez detectado e determinado o tempo de chegada da primeira onda nos terminais da linha, é necessário primeiramente que se determine o ramo onde a falta ocorreu.

O ramo da linha em que a falta está alocada é estimado com base a uma medida inicial da distância da falta entre os terminais e comparação desta com o comprimento de cada ramo da linha. A lógica para a determinação do ramo faltoso, considerando a Figura 3, é dada pela:

a) consideração das seguintes distâncias

$$l_{AI} = 150 \text{ km} \quad l_{AB} = 230 \text{ km}$$

$$l_{BI} = 80 \text{ km} \quad l_{AC} = 250 \text{ km}$$

$$l_{CI} = 100 \text{ km} \quad l_{BC} = 180 \text{ km}$$

b) estimação da distância da falta, tomando-se o comprimento entre os terminais AC, AB e BC, conforme as equações seguintes:

$$\begin{aligned} d_{AB} &= \frac{l_{AB} - v_1 \cdot (t_B - t_A)}{2} \\ d_{AC} &= \frac{l_{AC} - v_1 \cdot (t_C - t_A)}{2} \\ d_{BC} &= \frac{l_{BC} - v_1 \cdot (t_C - t_B)}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

c) e estimação do ramo faltoso conforme segue:

$$d_{AB} \leq l_{AI} \text{ e } d_{AC} \leq l_{AI} \leftrightarrow \text{Ramo1 ou AI}$$

$$d_{AB} > l_{AI} \text{ e } d_{BC} \leq l_{BI} \leftrightarrow \text{Ramo2 ou BI}$$

$$d_{AC} > l_{AI} \text{ e } d_{BC} > l_{BI} \leftrightarrow \text{Ramo3 ou CI}$$

Tendo estimado o ramo faltoso, processa-se então, o cálculo da distância do ponto de ocorrência da falta como segue:

$$d_{ji} = \frac{l_{ij} - v_1 \cdot (t_i - t_j)}{2} \quad (3)$$

onde: i identifica o terminal do ramo não faltoso, j identifica o terminal do ramo faltoso, d é a distância da falta (km), l o comprimento total da linha entre os terminais identificados por i e j , t_i é o tempo de chegada da primeira onda com o ramo não faltoso e t_j é o tempo de chegada da primeira onda no terminal do ramo faltoso.

A Figura 4 ilustra o fluxograma referente ao método de localização de faltas proposto.

Faz-se necessário comentar que os erros percentuais a serem apresentados neste texto são calculados com referência a seguinte equação:

$$e(\%) = \frac{|d_{ji} - d_{real}| * 100}{l_{ji}}$$

Nos gráficos e nas tabelas posteriores, os erros percentuais são definidos em relação à média das distâncias estimadas entre o terminal de referência e os demais terminais.

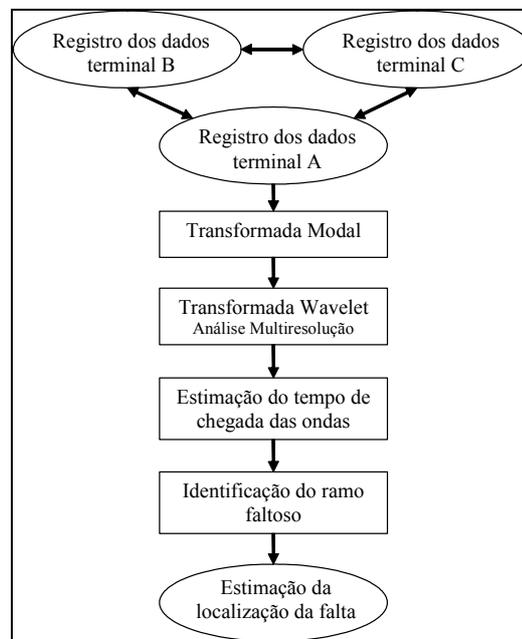


Figura 4 – Fluxograma referente ao método proposto

4.0 SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

Para uma validação inicial do algoritmo proposto, utilizou-se um modelo de linha de transmissão de 440 KV com três terminais em derivação, considerando-se linhas totalmente transpostas e com parâmetros distribuídos. A topologia do sistema elétrico analisado em todo o processo está representada na Figura 5.

Os dados dos sinais faltosos foram obtidos dispondo-se de simulações no *software* ATP (*Alternative Transients Program*), levando-se em conta alguns tipos de faltas aplicadas em diferentes localizações ao longo das linhas, com diferentes ângulos de incidência e resistências de falta. A frequência de amostragem do sinal utilizada foi de 240 kHz.

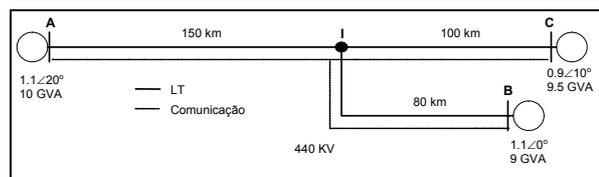


Figura 5 – Sistema Elétrico Analisado

5.0 TESTES E RESULTADO PRELIMINARES

Esta secção tem por objetivo apresentar a aplicabilidade do método proposto com base nos diferentes testes aplicados até o momento.

Inicialmente, pode-se tomar como exemplo uma situação de falta envolvendo a fase “A” com conexão a terra, aplicada a 130km da barra A, com um ângulo de incidência de 0° e resistência de falta de 100Ω . Assumindo a detecção da falta, com dados registrados em ambos os terminais, o localizador implementado de faltas é ativado. A Figura 6 ilustra os sinais de detalhe 2, do modo 1, referentes aos sinais de corrente registrados nos respectivos terminais. Pela análise destes sinais, o algoritmo detectou o instante de chegada das primeiras ondas como sendo: $t_a=28,8294$, $t_b=28,7294$ e $t_c=28,7961$ ms. No passo seguinte, o localizador identifica o ramo faltoso acertadamente indicando o ramo 1 ou AI e estima a localização da falta conforme a Eq. (3). Para este caso, a falta foi localizada a 129,66km da barra A com relação à barra B, ou a 129,88km da barra A com relação à barra C. O erro percentual foi de 0,23 e 0,08% do comprimento do ramo faltoso, respectivamente.

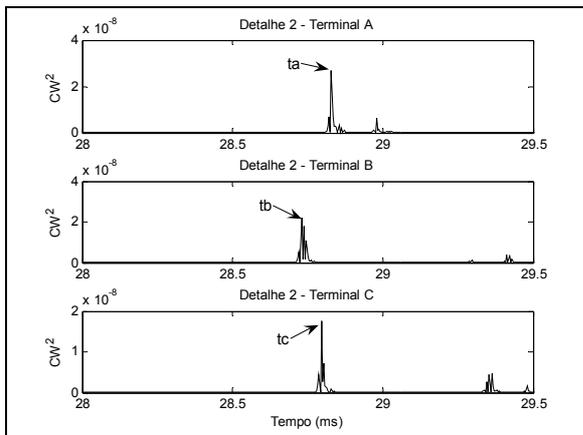


Figura 6 – Detalhe 2 – Falta AT, a 130 km da barra A, com ângulo de incidência de 0° e resistência de falta de 100Ω .

A Figura 7 ilustra os sinais de detalhe 2, do modo 1, referente aos sinais de corrente registrados nos três terminais para uma falta entre as fases A e B, aplicada a 25km da barra B, com ângulo de incidência de 90° . Neste caso, o algoritmo identificou corretamente o ramo faltoso como sendo o ramo 2 ou BI, com a distância estimada de 25,82km da barra B com relação à barra A, ou a 25,25km da barra B, com relação à barra C. O erro percentual foi de 1,02 e 0,32% do comprimento do ramo faltoso respectivamente.

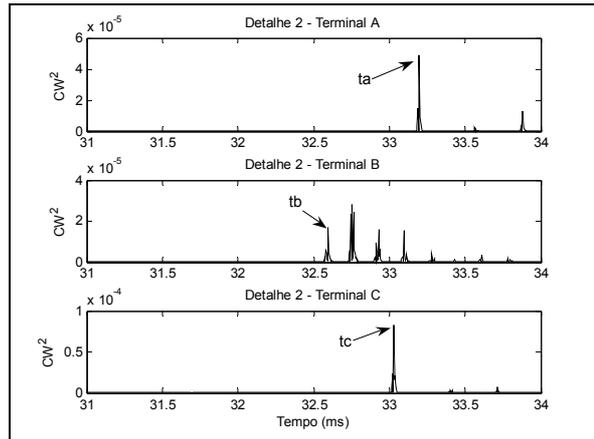


Figura 7 - Detalhe 2 – Falta AB a 25 km da barra B, com ângulo de incidência da falta de 90° .

As Figuras 8, 9 e 10 ilustram o desempenho do método frente às faltas fase-terra, aplicadas em diferentes localizações dos ramos. Pode-se observar pela Figura 8, onde foram aplicadas faltas sobre o ramo 1, com ângulo de incidência de 30° e diferentes resistências de falta, que a maioria dos erros observados foram inferiores a 0,5%. Destes apontamentos, conclui-se que a resistência de falta não trouxe grande influência na precisão da abordagem proposta.

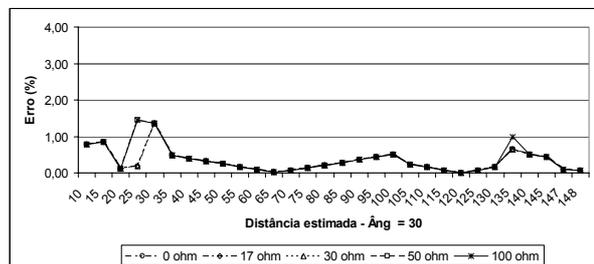


Figura 8 – Resultados para faltas fase-terra (AT) no ramo 1, com variação da resistência de falta.

Pela análise das Figuras 9 e 10, também observa-se que os erros apresentados pelo localizador de falta implementado foram, na sua grande maioria, inferiores a 1,5% e que a resistência de falta não levou o mesmo a grandes imprecisões ou alterações quanto a sua precisão. Tais observações são válidas mesmo quando submetido à faltas com elevada resistência (100Ω) associada a um baixo ângulo de incidência (0°), como ilustra a Figura 10.

Para as situações referentes a faltas fase-fase e trifásicas, comenta-se que a variação da distância e do ângulo de incidência da falta não ocasionaram grandes influências na precisão do algoritmo proposto. Para estas situações foi constatado um erro médio de 1%, com esporádicos casos relatando um erro de 2,5%.

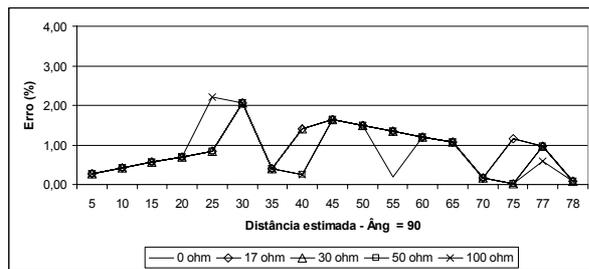


Figura 9 - Resultados para faltas fase-terra (AT) no ramo 2, com variação da resistência de falta.

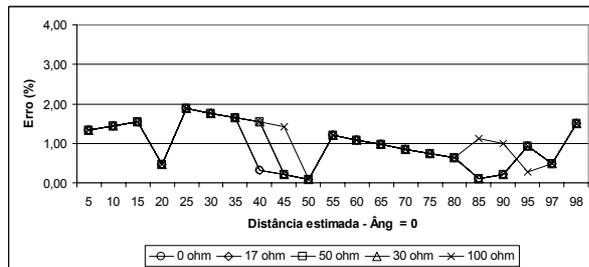


Figura 10 - Resultados para faltas fase-terra (AT) no ramo 3, com variação da resistência de falta.

Na Tabela a seguir são apresentados os erros médios gerais para todas as situações testadas até o presente, onde se pode observar o bom desempenho do algoritmo de localização de faltas para linhas com três terminais em análise.

Erro médio total para distintas situações de faltas simuladas.

Tipo da falta	Nº situações	Erro médio (%)
Fase-terra	1500	0.78
Fase-fase	300	0.77
Trifásicas	300	0.75

6.0 CONCLUSÕES PRELIMINARES

Tomando por base os resultados obtidos até o presente, pode-se concluir que tal estudo mostra-se viável, apontando a uma promissora aplicação prática do mesmo. O método proposto apresentou aplicabilidade aliada à confiança e precisão, importantes requisitos no contexto da qualidade da energia no que se refere à continuidade do fornecimento. Conhecendo-se com precisão o ponto de ocorrência de uma determinada situação de falta, um menor tempo pode ser despendido com os serviços de localização, reparo e manutenção da linha de transmissão. Destes fatos, uma rápida restauração da operação do sistema elétrico e, conseqüentemente, do fornecimento da energia elétrica poderá ser caracterizado.

Contudo, vale ressaltar que sobre estes resultados iniciais, faz-se necessário ainda um contínuo aprimoramento do algoritmo

implementado, por meio de estudos e aplicações de novas e diferentes situações encontradas na prática.

7.0 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos-USP pelas facilidades proporcionadas quando do desenvolvimento deste trabalho, bem como ao apoio financeiro recebido por parte da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Girgis, A. A.; Hart, D. G.; Peterson, W. L. *A new fault location technique for two-and-three terminal lines*. IEEE – Transactions on Power Delivery, 1992, v. 7, n. 1, jan.
- [2] Aggarwal, R. K.; Coury, D. V.; Johns, A. T. Kalam, A. *A practical approach to accurate fault location on extra high voltage teed feeders*. IEEE – Transactions on Power Delivery, 1993, v. 8, n. 3, jul.
- [3] Gong, Q.; Chen, Y.; Zhang, C.; Wang, Z., *A study of the accurate fault location system for transmission line using multi-terminal signals*. IEEE - Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, v. 4, jan.
- [4] Tziouvaras, D. A.; Roberts, J. Benmouyal, G. *New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines*. IEE - Seventh International Conference on Developments in Power System Protection, 2001, apr.
- [5] Hwan, K. C. e Aggarwal, R. *Wavelet transform in power systems: Part 1 General introduction to the wavelet transform*. IEE – Power Engineering Journal, 2000, v. 14, n. 2, apr.
- [6] Bewley, L. V. (1963). *Traveling waves on transmission systems*, John Wiley & Sons, New York, USA.
- [7] Clarke, E. (1943). *Circuit analysis of A-C power systems*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- [8] Urusawa, K.; Kanemaru, K.; Toyota, S.; Sugiyama, K. *New fault location system for power transmission lines using composite fiber-optic overhead ground wire (OPGW)*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, v.4, n.4, p.2005-2011, oct.
- [9] Zhao, W.; Song, Y. H.; Chen, W. R. *Improved GPS traveling wave fault locator for power cables by using wavelet analysis*. Electrical Power and Energy Systems, 2001, v.23.