



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPC - 25
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

A INFLUÊNCIA DE RÚIDO E SINAIS ESPÚRIOS NA PRECISÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO O MÉTODO DAS ONDAS VIAJANTES

Clever Pereira* Sérgio de S. Abreu Eduardo G. da Silveira Júlio Cezar D. Melo Rodrigo C. Bolda

UFMG

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise de sensibilidade sobre os parâmetros registro de tempo e velocidade de surto relacionados ao método de localização de faltas baseado em ondas viajantes. Foram realizados testes utilizando-se algoritmos baseados em filtros digitais e transformada "wavelet" aplicados a sinais gerados pelo ATP, aos quais foram adicionados ruído gaussiano em três níveis de relação sinal/ruído (SNR), a saber, 40, 50 e 60 dB. Em diferentes cenários de falta variou-se o ângulo de incidência da tensão, o valor da resistência e o nível de capacidade de curto-circuito das fontes terminais. Os resultados mostram os limites impostos ao método pela existência de ruído ao sinal adquirido, mostrando a necessidade de projetos de hardware para aquisição de sinais adequados a serem utilizados em equipamentos localizadores de falta.

PALAVRAS-CHAVE

Faltas, Ondas Viajantes, Transformada Wavelet, Filtros Digitais, Ruídos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os métodos de localização de faltas baseados na determinação da reatância aparente da linha de transmissão geralmente não produzem resultados satisfatórios quando são considerados casos de faltas em LTs com compensação série, com elevada instabilidade de arco de falta e com elevados valores de resistência de arco e injeção de corrente de falta pela fonte remota (*infeed* de corrente), entre outros (3). Estas deficiências dos métodos fásoriais motivaram uma busca por métodos alternativos baseados em ondas viajantes, que se mostram pouco sensíveis aos fatores citados anteriormente (2). Entretanto, alguns requisitos devem ser considerados na sua aplicação, tais como altas taxas de amostragem, capacidade adequada de armazenamento de eventos transitórios, necessidade de algoritmos de detecção de transitórios com boa resolução no domínio do tempo e de sincronização perfeita entre os terminais da linha, para os casos onde se utilizem dados de ambos os terminais da linha monitorada. Com o desenvolvimento das técnicas de processamento digital de sinais e a redução de custos de componentes eletrônicos, as exigências mencionadas acima podem ser satisfeitas a baixo custo, viabilizando a construção de equipamentos comerciais de localização de faltas em tempo-real baseados em ondas viajantes. É com esta motivação que vem sendo realizada a concepção e a construção de um sistema protótipo de localização de faltas por ondas viajantes, denominado LOV (1), pela equipe do PROTLab/UFMG, com o apoio da CEMIG. Neste protótipo utilizam-se dados dos dois terminais da linha de transmissão monitorada, com sincronização por

*LRC – Depto. Eng. Elétrica/UFMG – Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha
CEP 31270-000 – Belo Horizonte - MG - BRASIL
Tel.: (041)3499 - 5473 - Fax: (041) 3499 - 5480 - e-mail: clever@cpdee.ufmg.br

GPS. O sistema LOV envolve o desenvolvimento do software e hardware de aquisição de dados em alta velocidade.

2.0 - LOCALIZAÇÃO DE FALTAS POR ONDAS VIAJANTES

O princípio básico utilizado na localização de faltas por ondas viajantes consiste em detectar o instante em que as ondas de surto, provenientes de descontinuidades geradas por curtos-circuitos, chegam aos terminais de uma linha de transmissão. Para o método de localização com dois terminais, classificado como tipo D (3), a distância dos terminais da linha para falta se relaciona com a diferença entre os instantes de chegada destes surtos por:

$$x_i = \frac{L}{2} + \left(\frac{T_i - T_j}{2} \right) v \quad ; \quad \begin{cases} i = 1, 2 \\ j = 2, 1 \end{cases} \quad (1)$$

Nesta equação, L é o comprimento da linha, x_i é a distância do terminal i ao local da falta, v é a velocidade de propagação dos surtos na linha, T_i e T_j são os instantes de tempo em que as frentes de onda foram detectadas nos terminais i e j , respectivamente. Na equação (1) temos três parâmetros desconhecidos: a velocidade de propagação e os tempos de chegada dos surtos em cada extremidade da linha. Em termos práticos, a velocidade de propagação de uma dada linha de transmissão pode ser determinada através de uma operação de chaveamento em um dos seus extremos. Ao se efetuar o chaveamento realiza-se a medição direta do tempo de trânsito do surto originado. Como o valor do comprimento da linha é geralmente conhecido, é possível estimar a velocidade de propagação com o conhecimento do tempo de trânsito medido.

3.0 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para mensurar o nível de influência da velocidade de propagação adotada e dos tempos de registro dos surtos no valor da distância para falta é oportuno fazer uma análise da influência destes parâmetros na localização da mesma pela equação (1). Define-se sensibilidade absoluta local S_x , de uma função y em relação a um parâmetro x , tal que $y = f(x)$, como a derivada parcial do primeiro pelo último, ou seja:

$$S_x = \frac{\partial y}{\partial x} \quad (2)$$

A sensibilidade relativa, ou normalizada, de y em relação ao parâmetro x é dada por:

$$\sigma_{y,x} = \frac{x}{y} S_x \quad (3)$$

Aplicando as definições acima na equação (1), com $\Delta T = (T_i - T_j)$, obtém-se a sensibilidade relativa da distância do terminal i para falta em relação ao ΔT e à velocidade de propagação v :

$$\sigma_{x_i, \Delta T} = \sigma_{x_i, v} = \frac{v}{x_i} \cdot \frac{\Delta T}{2} \quad (4)$$

O valor normalizado obtido pela equação (4) é também chamado de fator de sensibilidade, podendo ser interpretado como a variação percentual sofrida por x_i quando um de seus parâmetros, ΔT ou v , varia de uma unidade percentual (1%). A equação (4) mostra ainda que a localização é igualmente sensível tanto à diferença entre os registros de tempo quanto à velocidade de propagação de surto na linha de transmissão. O nível de sensibilidade é alto para curtos-circuitos próximos à extremidade i da linha, como mostra a Figura 1, onde os valores de ΔT são maiores. Para faltas localizadas próximas ao meio da linha a sensibilidade é menor, o que já era esperado para um método diferencial, onde, especialmente neste caso, a distância do terminal para falta é praticamente independente da diferença entre os registros de tempo.

Para ilustrar a interpretação de sensibilidade da distância para falta em relação a diferença de tempo, considere uma linha de transmissão de 346 km de comprimento, com velocidade de propagação $v = 3 \times 10^5 \text{ km/s}$ ($300 \text{ m}/\mu\text{s}$). Supondo que uma falta ocorra a $311,4 \text{ km}$ de uma das extremidades ($x_i = 90\%$ do comprimento) tem-se que $\Delta T = 0,8\tau = 923 \mu\text{s}$, sendo τ o tempo de trânsito da linha. Nestas condições, uma variação de aproximadamente 1% em ΔT , algo em torno de $9,23 \mu\text{s}$, provocaria uma variação da distância para falta, calculada por (1), da ordem de 0,474% no seu valor real, o que equivale a um erro de $1,476 \text{ km}$. Esta alta sensibilidade à diferença entre os registros de tempo exige um valor elevado de taxa de amostragem e uma sintonia fina dos filtros digitais destinados a extrair a componente transitória dos sinais amostrados nos extremos da linha de transmissão, de forma que estes sinais sejam filtrados procurando-se conservar ao máximo as frequências representativas de

ordem mais alta. A condição crítica para registro de eventos transitórios ocorre quando se têm curtos-circuitos distantes de uma das extremidades da linha, pois nestes casos, a amplitude dos pulsos originados na falta é atenuada em maior quantidade ao se propagarem em direção ao terminal mais afastado da ocorrência da falta, dificultando a detecção precisa do seu instante de chegada.

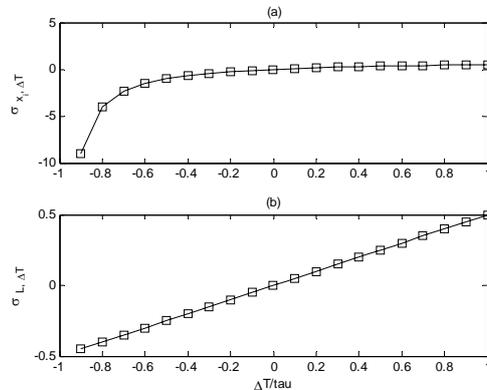


FIGURA 1 - Sensibilidade da distância para falta, vista pelo terminal i.
Curva (a) normalizada em relação a x_i , Curva (b): normalizada em relação a L

Uma outra consideração que merece especial atenção diz respeito ao erro máximo admissível para um método de localização de faltas por ondas viajantes. Suponha-se que seja desejável um localizador que tenha um erro máximo da ordem de 300 m , considerando-se como velocidade de surto a mesma dada anteriormente. Para a mesma distância de falta vista, este erro, na forma relativa, é da ordem de $0,09633\%$, em relação à distância para a falta. Isto implica que para localizar este curto-circuito, poder-se-ia errar, na diferença dos registros, em no máximo $0,203\%$ de $923\mu\text{s}$, o que equivale a aproximadamente $1,9\mu\text{s}$. Se for considerada uma taxa de amostragem de 1 MHz , o localizador terá como limite admissível de erro um intervalo de tempo equivalente a duas amostras. Em situações nas quais as características de faltas são favoráveis, obtêm-se erros até menores do que estes, mas é importante não generalizar pelos melhores casos, pois em situações de falta cujo surto originado é muito pequeno ou o nível de ruído presente nos sinais amostrados é elevado, dificilmente conseguir-se-ia um erro da ordem de 300 m , o que será constatado adiante no trabalho.

4.0 - MÉTODOS DE DETECÇÃO E FILTRAGEM DE SINAIS TRANSITÓRIOS

Um algoritmo de localização de faltas por ondas viajantes pode ser dividido em três etapas principais: extração da informação transitória do sinal amostrado, detecção da chegada do evento transitório e cálculo da distância para a falta. A primeira etapa consiste na separação da informação transitória presente no sinal de corrente ou de tensão, utilizando-se geralmente técnicas de processamento de sinais como transformada “*wavelet*”, filtros digitais, entre outras. Na segunda etapa é realizada uma discriminação que permita estabelecer uma diferença entre ondas de regime permanente das de surto que chegam nas extremidades da linha de transmissão. Nesta etapa pode-se empregar técnicas de correlação cruzada, detecção por limiar ou quaisquer outras. A última etapa utiliza os registros temporais, fornecidas na etapa anterior, para realizar o cálculo da distância para falta, juntamente com velocidade de surto e o comprimento da linha.

Neste trabalho foram empregadas três técnicas para a primeira etapa: (1) filtragem através de um filtro passa-faixa do tipo Butterworth, (2) transformada wavelet e (3) um método híbrido, composto de filtro digital passa-faixa e transformada wavelet. Como o híbrido apresenta uma robustez e desempenho semelhante ao passa-faixa, optou-se por apresentar apenas os resultados do primeiro. Porém, é importante esclarecer que em geral o método híbrido oferece um melhor desempenho em relação ao valor de erro de localização.

4.1 Filtros Digitais

Esta técnica consiste basicamente em aplicar um filtro digital do tipo ButterWorth, com banda de passagem definida pelo usuário. O sinal $x[n]$ corresponde a corrente amostrada em cada fase e o sinal $y[n]$ corresponde à saída do filtro.

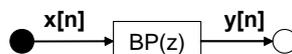


FIGURA 2 – Filtro Passa-faixa digital

4.2 Transformada Wavelet

A transformada discreta wavelet (TDW) tem sido usada extensivamente na análise de distúrbios elétricos (4-7). Ela possui como principal característica a localização nos domínios do tempo e da frequência. É uma ferramenta poderosa para análise de transitórios, em particular, se aplicada à localização de surtos bem localizados no tempo e que possuem frequências representativas de ordem elevada. Esta característica da TDW permite extrair transitório superposto a sinais fundamentais do sistema de potência com elevada precisão. A Figura 3 mostra o diagrama de implementação da TDW através de um banco de filtros digitais. Para maiores detalhes acerca da implementação as referências (7-8) podem ser consultadas.

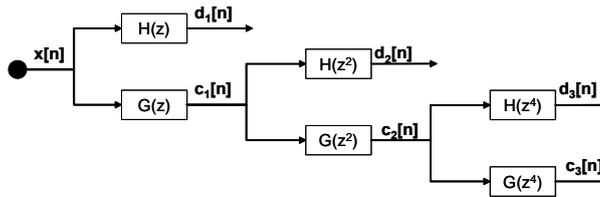


FIGURA 3 – Banco de filtros multi-estágio para implementação da TDW

A TDW é definida como:

$$TDW[m, n] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k x[k] g \left[\frac{k - na_0^m}{a_0^m} \right] \quad (5)$$

Nesta equação $g[n]$ é chamada de wavelet mãe e corresponde a resposta ao impulso de um filtro digital passa-baixas, os parâmetros de escala e translação a_0^m e na_0^m são funções do parâmetro inteiro m . Teoricamente qualquer tipo de wavelet mãe pode ser utilizada, mas é prática comum escolher aquela cujas características particulares são desejáveis para o domínio do problema sob análise. No caso de detecção de transitórios é importante escolher uma wavelet que seja capaz de reter qualquer mudança brusca do sinal sob análise. No presente trabalho foram avaliadas as wavelets do tipo Daubechies1 e Daubechies6, definidas em (8).

5.0 - SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para gerar os sinais de falta utilizou-se um sistema de transmissão de 345 kV, com uma linha trifásica de 346 km de comprimento, alimentada por duas fontes terminais, vide Figura 4. As faltas foram simuladas no ATP, com ocorrências a várias distâncias d_i da barra local B01. Estas distâncias estão na forma percentual em relação ao comprimento total da linha de transmissão LT: 10% (34.6 km), 30% (103.8 km), 60% (207.6 km) e 80% (276.8 km). Os erros relativos percentuais de localização são determinados em relação ao comprimento total da linha de transmissão.

Aos sinais de corrente de fase, medidos nas extremidades da LT da Figura 4, foram adicionados níveis de ruído em três faixas de SNR (Signal Noise Ratio) de potência: 40, 50 e 60 dB. Estes valores foram adicionados considerando-se como 0 dB o valor correspondente à amplitude dos sinais de entrada em regime permanente senoidal, sem quaisquer perturbações. Nas simulações foi utilizada uma frequência de amostragem igual a 1 MHz e decomposições em wavelet até o 3º nível.

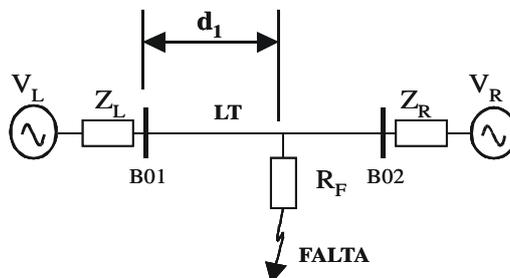


FIGURA 4. Diagrama esquemático do sistema de transmissão simulado.

Foram realizados 576 testes com 192 casos de falta, simulados através do ATP. Cada um destes casos contempla a variação de um dos seguintes parâmetros: capacidade das fontes equivalentes terminais ($ZL/ZR = 1, 0.1$ e 10), resistência de falta ($0, 50, 100$ e 400 ohms), ângulo de incidência da tensão no local da falta (0 e 90°). Cada teste avalia a localização da falta com os sinais acrescidos dos três níveis de ruído.

A experiência de laboratório realizada com a placa de aquisição de dados, desenvolvida especialmente para trabalhar em conjunto com o software do LOV, mostra que o SNR de um sinal real vai estar compreendido entre 50 e 60 dB. A Figura 5 ilustra um sinal senoidal amostrado com a placa desenvolvida.

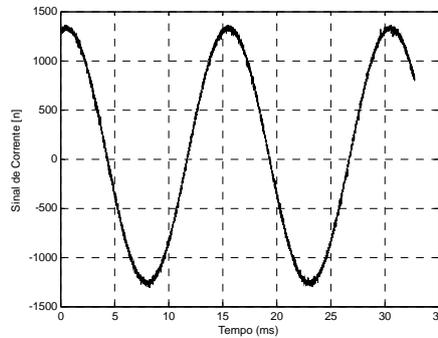


FIGURA 5 – Sinal real, amostrado em laboratório

Nas figuras que se seguem são mostrados de forma compactada os resultados alcançados. São visualizadas figuras só de três configurações de nível de ruído: uma considerando uma situação ideal, sem a presença de ruído, para fins de comparação de desempenho; uma segunda situação que mostra um nível crítico de ruído com $SNR = 40$ dB; e por fim, uma terceira com um valor de $SNR = 60$ dB, que parece ser a mais próxima de casos reais. Os resultados relativos a situação com $SNR = 50$ dB não foram mostrados, pois representam uma situação intermediária entre 40 dB e 60 dB. Os erros de localização são mostrados na forma percentual, em relação ao comprimento da linha. Em cada uma das figuras que se seguem podem ser visualizados dois tipos de gráfico: o primeiro corresponde aos erros para todo o conjunto simulado, e um segundo, onde é possível identificar a distribuição dos casos por faixa de erro. No primeiro tipo de gráfico, os índices dos casos correspondem ao eixo horizontal e o erro é desenhado na vertical. O segundo tipo mostra um histograma com a distribuição dos casos por faixa de erro, no eixo horizontal são visualizados os intervalos de erro e no vertical o percentual dos casos localizados dentro de cada intervalo. É importante destacar que nos gráficos abaixo não existe valor de erro igual a zero. No primeiro tipo de gráfico, onde isto ocorre, significa que o caso em questão não foi localizado, por exemplo, nos casos entre os índices 115 a 134 , do conjunto de casos da Figura 6 – (a).

A relação S/T , mostrada em cada figura, significa a razão entre os casos localizados (S = número de casos localizados com Sucesso) e o total do conjunto de casos (T = Total de casos).

Nível de ruído nulo, ($SNR = \infty$)

Esta configuração corresponde a uma situação ideal. Os sinais de corrente de saída do ATP foram aplicados diretamente ao programa desenvolvido. Os resultados são mostrados nas Figuras 6 e 7.

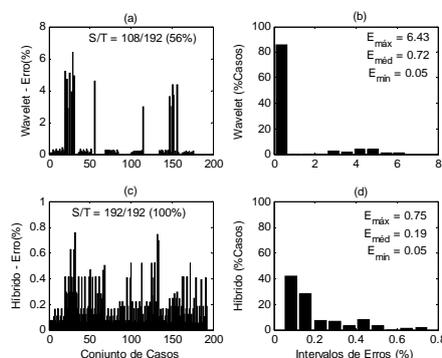


FIGURA 6 – Resultados para decomposição com db1

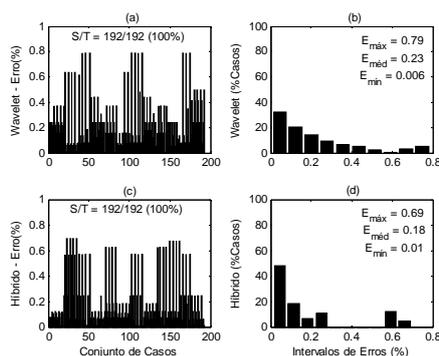


FIGURA 7 – Resultados para decomposição com db6

Na Figura 7, que representa a decomposição utilizando a wavelet db6, é indicado o valor do erro máximo para ambos algoritmos, que é igual $0,8\%$ ($2,768\text{ km}$), sendo que para o algoritmo wavelet têm-se aproximadamente 95% dos casos apresentando erros inferiores a $0,5\%$ ($1,73\text{ km}$), já para o método híbrido têm-se 80% dos casos com erros menores que $0,5\%$. As Figuras 7 – (b) e (d) mostram ainda que mais de 60% dos casos apresentam erros inferiores ao erro médio, que é de $0,23\%$ ($0,795\text{ km}$) para o método wavelet e $0,18\%$ ($0,622\text{ km}$) para o híbrido. A wavelet do tipo db1 apresentou erros maiores, como mostra a Figura 6. Entretanto sua implementação é simples e como será visto mais adiante ela apresenta maior robustez quando há presença de ruído no sinal.

Nível de ruído SNR = 40 dB

Esta faixa de ruído é bastante severa. Provavelmente poucos sistemas de aquisição de dados injetam ruído neste patamar ou caso ocorra, trata-se de projeto de hardware mal executado. A Figura 8 mostra os resultados para decomposição com db1. Para esta situação obteve-se apenas 46% dos casos localizados com erros máximos da ordem de $1,35\%$ ($4,671\text{ km}$) para o híbrido e $4,6\%$ ($15,916\text{ km}$) para wavelet, com db1. Os valores de erro são grandes em virtude do nível crítico de ruído. Mesmo nestas situações os métodos garantem localização de mais da metade dos casos com erros inferiores ao erro médio de $0,54\%$ ($1,86\text{ km}$). Nesta faixa de ruído e neste nível de decomposição não houve localização com wavelet db6, pois esta se mostrou bastante sensível a presença de ruído no sinal.

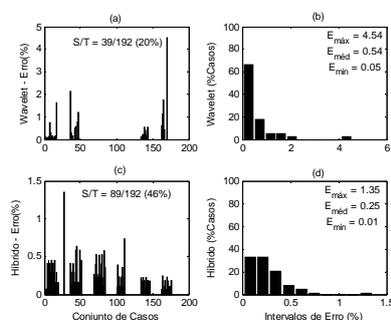


FIGURA 8 – Simulação com wavelet db1, 3º nível

Nível de ruído SNR = 60 dB

As Figuras 9 e 10 a seguir ilustram os resultados obtidos. Comparando as Figuras 8 e 9 observa-se que houve uma melhora significativa no desempenho dos dois métodos, tanto em valores de erro, quanto no percentual total de casos localizados para erros inferiores a 1% . Os casos com elevados valores de resistência de falta e ângulos de incidência nulos chegam a apresentar erros de grande magnitude. Verifica-se que estes casos são diferenciados em relação aos demais casos. Para exemplificar pode-se tomar o caso de índice 99 da Figura 9(c), como representante dos casos atípicos, com erro acima de 2% : trata-se de uma falta fase-fase, a 103 km de um dos terminais, com ângulo de incidência nulo e valor de resistência de falta elevado, igual a 400 ohms . Os casos mais comuns, como curtos-circuitos fase-terra com ângulo de incidência de 90° , apresentam, de maneira geral, erros inferiores ao erro médio de cada conjunto de casos. A queda de desempenho do método wavelet pode ser visto comparando entre si as Figuras 9(a), 10(a) e 6(a).

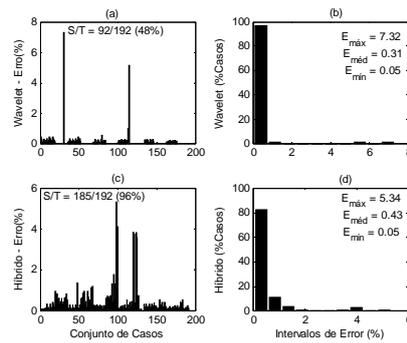


FIGURA 9 – Simulação com wavelet db1, 3º nível

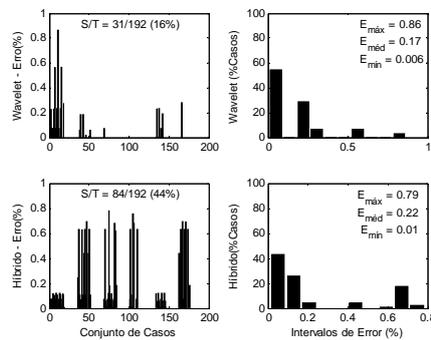


FIGURA 10 – Simulação com wavelet db6, 3º nível

6.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma análise de sensibilidade com a investigação de dois tipos de algoritmos de extração de sinais transitórios para localização de faltas por ondas viajantes. O primeiro algoritmo denominado híbrido, baseado em filtros digitais passa-faixa e TDW, e um segundo por meio somente da TDW. O primeiro algoritmo parece ser mais robusto e apresenta uma boa confiabilidade quando aplicado a sinais com ruído, podendo ser aplicado para os casos mais comuns de falta, em ambientes que podem injetar até $50dB$ de SNR. Os resultados mostraram que este método pode assegurar até 1% de erro para mais de 80% dos casos de falta frequentemente encontrados na prática, como faltas fase-terra com baixo ou alto valor de resistência de falta. A TDW se mostrou muito sensível à presença de ruído, principalmente as wavelets que possuem boa localização em ambos os domínios (tempo e frequência), como a wavelet do tipo db6. Como forma alternativa, fez-se uma pré-seleção da faixa de frequência sob interesse através de um filtro passa-faixa, posteriormente aplicou-se a transformada wavelet (o método híbrido). Com este procedimento conseguiram-se bons resultados com a wavelet do tipo db1.

Independente do algoritmo a ser utilizado para extração do sinal transitório, é importante mencionar os níveis máximos de erro aos quais o método do tipo D está sujeito. Para que um erro máximo de 0,5% (1,73 km), em relação ao comprimento da linha seja atingido, seria necessário que o detector de transitórios tivesse um erro de registro de intervalo de tempo inferior a aproximadamente $12 \mu s$. Esta restrição é bastante severa em situações de elevado nível de ruído, como abaixo de $40dB$.

Em todos os resultados mostrados pôde-se concluir que há um compromisso na escolha do método. Enquanto o algoritmo baseado em filtros digitais passa-faixa oferece maior robustez, o método wavelet oferece a possibilidade de realizar detecções de transitório com uma margem de erro menor quando o valor de SNR é alto (baixos níveis de ruído). O método híbrido estabelece uma solução onde se tenta tirar proveito dos dois métodos. Tomando todos estes fatores em conta, se for fixado um limite de erro não muito severo, diga-se por volta de 1% do comprimento da linha de transmissão, o método que utiliza filtros digitais passa-faixa é satisfatório.

Por fim é importante mencionar que os resultados apresentados neste trabalho podem ser melhorados com o aumento do nível de decomposição em wavelet. Entretanto o custo computacional deste procedimento deve ser

cuidadosamente avaliado, uma vez que a aplicação de um simples filtro passa-faixa com a wavelet db1 pode oferecer um resultado satisfatório e com maior robustez.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) PEREIRA, C., SILVEIRA, E.G., ABREU, S.S. LOV – Um Localizador de Falhas Baseado no Método das Ondas Viajantes. XVII SNPTEE. Grupo de Proteção, Medição e Controle em SEP. Uberlândia, outubro de 2003.
- (2) LEWIS, L.J. Travelling Wave Relations applicable to power-system fault locator. AIEE, Trans. Vol. 50 , 1671-1680.
- (3) GALE, P.F., CROSSLEY, P.A. Fault Location Based on Travelling Waves. 54 – 59.
- (4) ROBERTSON, David C., CAMPS, Octavia I., MAYER, Jeffrey S. and GISH, Willian B. Wavelets and Eletctromagnetic Power System Transients. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, no. 2, pp. 1050 - 1056, April 1996.
- (5) SANTOSO, S., POWER, E.J., GRADY, W.M., HOFMANN. Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No 2, pp. 924 – 930. April 1996.
- (6) MAGNAGO, F.H., ABUR, A. Fault Location Using Wavelets. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No 4, pp. 1475 – 1480. October 1998.
- (7) VETTERLI, Martin, KOVACEVIC, Jelena. Wavelets and Subband Coding. Prentice-Hall, New Jersey, 1995.
- (8) DAUBECHIES, Ingrid. Tem Lectures on Wavelet. Capital city Press. 1992.