

## LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO A REPRESENTAÇÃO WAVELET MULTIRESSOLUÇÃO

LUCIANA R. SOARES<sup>1</sup>, MANOEL A. DE CARVALHO JÚNIOR<sup>1</sup>, HÉLIO M. DE OLIVEIRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Depto. de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência, <sup>2</sup>Depto. de Eletrônica e Sistemas  
Universidade Federal de Pernambuco

Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, CEP: 50.740-530, Recife, PE, BRASIL, +55-81-3271-8211 (Ramal 251)

E-mails: [lusoares@npd.ufpe.br](mailto:lusoares@npd.ufpe.br), [macj@npd.ufpe.br](mailto:macj@npd.ufpe.br), [hmo@npd.ufpe.br](mailto:hmo@npd.ufpe.br)

**Resumo**— Este artigo apresenta resultados preliminares da aplicação da teoria de wavelets na localização de faltas em linhas de transmissão. As faltas foram simuladas em uma linha de transmissão em 500kV, sendo considerada a aquisição dos sinais de tensão e corrente monofásicos em apenas um dos terminais da linha, através de um instrumento de monitoração com taxa de amostragem de 128 amostras/ciclo. Uma nova metodologia é apresentada considerando a decomposição dos sinais de falta em três escalas no processo de codificação por sub-bandas e o método da impedância aparente.

**Abstract**— This paper presents a preliminary investigation on the use of the wavelet theory for fault location in transmission lines. Faults were simulated in a 500kV transmission line, with the acquisition of the single phases of voltages and currents signals in only one-ended terminal of the line, with 128 points/cycle monitoring instrument. A new methodology is showed considering three level decomposition of fault signals by sub-band coding and the apparent impedance technique.

**Keywords**— Fault Location; Wavelets; Multiresolution Analysis; Apparent impedance technique.

### 1 Introdução

Nos últimos anos, o setor elétrico brasileiro vem passando por um processo de desestatização, e com isso, o mercado de energia vem se tornando bastante competitivo. As empresas de energia elétrica buscam assegurar uma fatia significativa do mercado, representada pelos grandes consumidores de energia elétrica, através da oferta de energia a um menor custo e com alto padrão de qualidade. Estas empresas são forçadas a atuar de forma mais eficiente, utilizando-se de modernos sistemas de gerenciamento de energia, capazes de possibilitar a redução do período de interrupção do fornecimento de energia, em caso de falhas, e garantir a operação segura e econômica do sistema de potência, seja em condições normais de operação ou em contingência.

Interrupções no serviço podem ser provocadas pela ocorrência de diferentes tipos de fenômenos eletromagnéticos no sistema elétrico e podem afetar classes de consumidores de formas distintas. Uma das principais causas da interrupção do fornecimento de energia elétrica é a ocorrência de faltas em linhas de transmissão.

A atuação adequada dos sistemas de proteção, de modo a isolar a região sob falta, é o principal recurso do sistema elétrico para evitar danos a equipamentos e para restaurar as condições pré-falta. Para a região isolada pela atuação da proteção, a interrupção é caracterizada como uma falta permanente e são requeridas ações corretivas de modo a restabelecer o fornecimento de energia aos consumidores atingidos.

Várias empresas do setor elétrico brasileiro dispõem de instrumentos com a função específica de localizar faltas em linhas de transmissão. Porém, outros instrumentos, especialmente aqueles recém-adquiridos para a monitoração da qualidade da

energia elétrica, que não incorporam esta função, também podem ser utilizados para este fim, seja através da implementação de um algoritmo em sua memória ou em uma central de análise.

Este trabalho apresenta uma alternativa para localização de faltas em linhas de transmissão, com base na teoria de wavelets e na técnica de representação multiresolução de sinais. Esta análise é realizada a partir de simulações de faltas em uma linha de transmissão em 500kV, pertencente à interligação Norte/Nordeste, através do uso do ATP (*Alternative Transient Program*), considerando que os sinais de falta são obtidos por um instrumento de monitoração com taxa de amostragem de 128 amostras/ciclo.

Considere  $Z$  o conjunto dos inteiros e  $l^2$  o espaço de sinais discretos de energia finita.

### 2 A Representação Wavelet Multiresolução

#### 2.1 A Transformada de Wavelets

A transformada de wavelets tem se mostrado uma ferramenta matemática bastante eficiente na análise de sinais transitórios em sistemas de potência, por permitir a análise local de características destes sinais através de sua representação simultaneamente em dois domínios: tempo e frequência [Soares, 2001].

A transformada de wavelets discreta  $d_{m,n}$ , de um sinal  $f(k)$  de tempo discreto é definida por:

$$d_{m,n} = a_0^{-m/2} \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k) \cdot \psi(a_0^{-m} \cdot k - n \cdot b_0),$$

em que  $k, m, n, a_0$  e  $b_0 \in Z$ ,  $a_0 > 1$  e  $b_0 \neq 0$ .

Para escolhas especiais do sinal  $\psi(t)$ , a wavelet-mãe, e dos parâmetros  $a_0$  e  $b_0$ , as wavelets filhas  $\psi(a_0^{-m} \cdot k - n \cdot b_0)$  irão constituir uma base

ortonormal no  $l^2$ . A escolha de  $a_0 = 2$  e  $b_0 = 1$  permite que seja obtida a mais simples das construções, sendo chamada de transformada de wavelets diádica ortonormal [Daubechies, 1992].

Uma implementação computacional bastante eficiente desta transformada pode ser obtida através de algoritmos baseados na codificação por sub-bandas.

## 2.2 O Processo de Codificação por Sub-Bandas

O processo de codificação por sub-bandas é uma técnica de processamento de sinais que tem como objetivo dividir o espectro de um sinal em sub-bandas, através do uso de um banco de filtros. Estas sub-bandas são independentes quando são utilizados filtros espelhados em quadratura (QMF – *Quadrature Mirror Filters*), como é o caso da Representação Wavelet Multiresolução (RWM) [Mallat, 1989].

Na RWM, a teoria de wavelets e a teoria da representação multiresolução de sinais se combinam, permitindo que qualquer sinal  $f(k) \in l^2$  possa ser decomposto em suas versões aproximada e detalhada, através do uso de filtros escala e wavelet, respectivamente. Por definição, filtros escala e wavelet constituem-se, respectivamente, em filtros passa-baixa e passa-faixa.

A figura 1 ilustra, como exemplo, o processo de representação do algoritmo de codificação por sub-bandas baseada na RWM em três escalas de decomposição. Nesta figura, estão apresentadas as versões aproximadas,  $c_1(n)$ ,  $c_2(m)$  e  $c_3(q)$ , e detalhadas,  $d_1(n)$ ,  $d_2(m)$  e  $d_3(q)$ , do sinal  $c_0(k)$  nas escalas correspondentes, onde  $h(n)$  e  $g(n)$  são, respectivamente, os coeficientes dos filtros escala e wavelet.

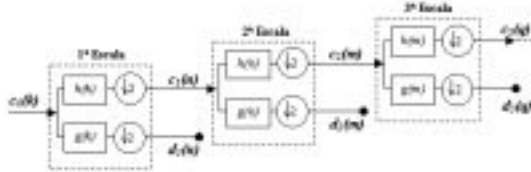


Figura 1: Decomposição do sinal  $c_0(k)$  em três escalas.

Portanto, o processo de representação do algoritmo baseia-se em operações de convolução e dizimação em cada escala, cujo objetivo é decompor a versão aproximada do sinal, à escala  $j$ , em suas versões aproximada e detalhada, à escala  $j+1$ . Devido à operação de dizimação, os sinais à escala  $j+1$  têm seu comprimento e largura de faixa de frequências reduzidos à metade, em relação aos sinais à escala  $j$ .

A frequência de corte  $f_{c,j}$  dos filtros escala e wavelet, à escala  $j$ , é definida por:

$$f_{c,j} = \frac{f_s}{2^{(j+1)}}$$

onde  $f_s$  é a frequência com a qual o sinal original foi amostrado.

Conseqüentemente, o espectro de frequências das versões aproximadas e detalhadas, à escala  $j$ , compreende, respectivamente, a faixa de 0 a  $f_{c,j}/2$  e  $f_{c,j}/2$  a  $f_{c,j}$ .

## 3 O Processo de Localização de Falhas

### 3.1 Introdução

Os algoritmos utilizados para localizar falhas em linhas de transmissão podem ser classificados, basicamente, em duas categorias:

- Métodos que fazem uso das componentes à frequência fundamental, e
- Métodos que fazem uso das componentes de alta frequência dos sinais transitórios relacionados à falta.

Um dos algoritmos mais utilizados para localizar falhas em linhas de transmissão, e que considera as componentes à frequência fundamental, está baseado na determinação da impedância aparente da linha de transmissão durante a falta. Esta impedância é obtida em função dos parâmetros da linha de transmissão e dos fasores de tensão e corrente, obtidos em um dos terminais da linha de transmissão.

Os algoritmos baseados nas componentes de alta frequência dos sinais transitórios estão fundamentados na teoria de ondas viajantes e em curtos intervalos de amostragem [Magnago e Abur, 1998]. Estes algoritmos baseiam-se na determinação do tempo de viagem da onda do ponto de falta ao terminal de monitoramento e na velocidade de propagação da onda viajante na linha.

A característica de localização tempo-frequência da transformada de wavelets permite obter alta resolução no tempo nas altas frequências, devido aos curtos intervalos de amostragem nas altas frequências, e alta resolução em frequência nas baixas frequências, devido aos longos intervalos de amostragem nas baixas frequências.

Devido a esta propriedade da transformada de wavelets, tanto os métodos baseados nas componentes de alta frequência quanto os métodos baseados nas componentes à frequência fundamental podem ser utilizados em uma implementação para a localização de falhas em linhas de transmissão. A escolha por um dos métodos deve estar condicionada à frequência de amostragem empregada pelo RDP para a aquisição dos sinais.

Outra consideração que deve ser feita é quanto à configuração do sistema de monitoramento dos sinais de tensão e/ou corrente na linha de transmissão. Quando se considera a configuração de um sistema de monitoramento da qualidade da energia elétrica, a escolha por algoritmos baseados em técnicas *single-ended* deve prevalecer, pois, em geral, a aquisição dos sinais de tensão e/ou corrente ocorre em apenas um dos terminais da linha de transmissão.

### 3.2 Métodos baseados na Teoria de Wavelets

Três métodos descritos na literatura consideram o emprego da teoria de wavelets na localização de faltas, a partir de dados provenientes de apenas um dos terminais da linha de transmissão: [Magnago e Abur, 1998; Silveira *et al.*, 2001; Yibin *et al.*, 1997]. Nestes métodos considera-se o emprego do algoritmo de codificação por sub-bandas, utilizando “Daubechies 4” como wavelet-mãe [Daubechies, 1992].

Em [Magnago e Abur, 1998; Silveira *et al.*, 2001] estão apresentados métodos que consideram a propriedade de alta resolução no tempo da transformada de wavelets, visto que fazem uso das componentes de mais alta frequência dos sinais de falta. Nestes casos, a localização da falta é obtida em função do intervalo de tempo entre picos consecutivos nos coeficientes wavelet do sinal amostrado e do conhecimento da velocidade de propagação da onda viajante na linha de transmissão. São consideradas frequências de amostragem de 100kHz e 200kHz, respectivamente.

Considerando a propriedade de alta resolução em frequência, em [Yibin *et al.*, 1997] está apresentado um método que faz uso das componentes à frequência fundamental do sistema para promover a localização da falta. Neste método, considera-se que as componentes à frequência fundamental dos sinais de tensão e corrente são os sinais que fazem parte da faixa de frequências que compreende a frequência fundamental do sistema de potência. Como os sinais são amostrados à frequência de 5kHz, as componentes fundamentais estão inclusas na sexta escala, que compreende a faixa de frequências de 39,06 a 78,13Hz. Porém, nesta escala, os sinais são representados por menos de 2 amostras/ciclo, o que pode ser considerado insuficiente para representar um sinal. Como solução, considera-se o emprego do algoritmo de codificação por sub-bandas de tempo invariante [Yibin *et al.*, 1997], que mantém o mesmo número de amostras em todas as escalas.

### 3.3 Considerações sobre a frequência de amostragem

Uma limitação encontrada na implementação dos algoritmos que consideram o emprego da teoria de ondas viajantes decorre da necessidade da utilização de frequências de amostragem bastante superiores àquelas disponíveis nos instrumentos de aquisição de sinais empregados na monitoração da qualidade da energia elétrica, também chamados de registradores digitais de perturbação (RDPs) [Ramos, 2000b]. Estima-se em [Magnago e Abur, 2000] que seria necessária uma taxa de 1.024 amostras/ciclo para obter uma precisão da ordem de 5km na localização da falta.

Para uma taxa de 128 amostras/ciclo, os métodos baseados nas componentes à frequência fundamental devem ser mais indicados [Soares, 2001].

Ao considerar sinais amostrados a 128 amostras/ciclo e o algoritmo proposto em [Yibin *et al.*, 1997], as componentes fundamentais destes sinais são obtidas à sexta escala, conforme tabela I. Porém, nesta escala, o filtro wavelet tem frequência de corte idêntica à frequência fundamental do sistema de potência. Diante disto, a implementação do algoritmo proposto pode não representar com fidelidade as componentes a 60Hz.

Tabela I: Faixas de Frequências nas Escalas de Decomposição do Algoritmo de Codificação por Sub-Bandas baseado na RWM para uma Taxa de Amostragem de 128 amostras/ciclo.

Escala	Quantidade de Amostras/ciclo		Filtro Escala (Hz)	Filtro Wavelet (Hz)
	T.V. <sup>1</sup>	T.Inv. <sup>2</sup>		
1	64	128	0 – 1.920	1.920 – 3.840
2	32	128	0 – 960	960 – 1.920
3	16	128	0 – 480	480 – 960
4	8	128	0 – 240	240 – 480
5	4	128	0 – 120	120 – 240
6	2	128	0 – 60	60 – 120
7	1	128	0 – 30	30 – 60

<sup>1</sup> Algoritmo de Codificação por Sub-Bandas (Tempo Variante).

<sup>2</sup> Algoritmo de Codificação por Sub-Bandas de Tempo Invariante.

### 3.4 O Sistema em Estudo

O sistema em estudo consiste de uma linha de transmissão em 500kV, a LT Presidente Dutra/Boa Esperança, LT PDD/BEA, que faz parte da interligação Norte/Nordeste e tem 205,6km de comprimento. Seus parâmetros distribuídos estão apresentados na tabela II.

Tabela II: Parâmetros Distribuídos da LT PDD/BEA.

Seqüência	Parâmetros da Linha de Transmissão		
	R ( $\Omega$ /km)	L (mH/km)	C (nF/km)
Positiva	0,0246	0,8539	13,66
Zero	0,3818	3,732	8,61

A figura 2 ilustra, de forma simplificada, o trecho do sistema de transmissão utilizado nas simulações. Nesta figura,  $Z_{LT}$  é a impedância da LT PDD/BEA,  $Z_{e1}$  e  $Z_{e2}$  são, respectivamente, a impedância do equivalente Thevenin no terminal de PDD e de BEA;  $E_{e1}$  e  $E_{e2}$  são, respectivamente, as fontes de tensão do equivalente Thevenin nestes mesmos terminais.

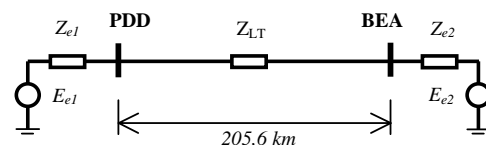


Figura 2: Diagrama simplificado do sistema de transmissão utilizado para as simulações.

As faltas foram simuladas no ATP (*Alternative Transient Program*), considerando que o monitoramento da linha é realizado no terminal de PDD, através de um RDP. Hipoteticamente, este RDP registra os sinais de fase das tensões e correntes, quando da ocorrência de uma variação de

tensão, através da transdução destes sinais por transformadores de tensão (TPs) e de corrente (TCs).

Nas simulações foi assumido que os TPs e TCs utilizados no terminal de monitoramento apresentariam uma largura de faixa de frequência de 15,36kHz, o que corresponde a um intervalo de amostragem de 65,10 $\mu$ s. Nos secundários dos TPs e TCs foi empregada uma taxa de amostragem de 128 amostras/ciclo, a taxa de amostragem do RDP.

Considerou-se ainda que a linha de transmissão é totalmente transposta, tendo sido empregado o modelo a parâmetros distribuídos. O período de simulação foi de oito ciclos, considerando-se a ocorrência das faltas a quatro ciclos do início das simulações, com impedância de falta nula e não sendo considerada a atuação de sistemas de proteção para sua eliminação.

Foram analisadas faltas ocorridas a 25%, 50% e 75% do comprimento total da linha de transmissão:

- Faltas fase-terra: FTA, FTB e FTC;
- Faltas fase-fase: FFAB, FFAC e FFBC;
- Faltas fase-fase-terra: FFTAB, FFTAC e FFTBC;
- Falta trifásica: FFF ou ABC.

## 4 Uma Proposta para Localizar Faltas

### 4.1 Considerações Iniciais

A partir dos sinais oriundos das simulações no ATP, suas versões aproximadas e detalhadas foram obtidas através da implementação do algoritmo de codificação por sub-bandas, baseada na RWM, utilizando “Daubechies 4” como wavelet-mãe [Daubechies, 1992].

Ao analisar as versões aproximadas obtidas via simulação, observou-se que poder-se-ia obter uma estimativa da localização da falta ao empregar as aproximações de terceira escala dos sinais de tensão e corrente de falta. Nesta escala, os sinais são representados por 16 amostras/ciclo, que corresponde à quantidade mínima recomendada de amostras/ciclo para que seja possível realizar a análise de sinais de falta [Ramos, 2000a].

As versões aproximadas dos sinais de tensão e corrente são representadas por 16 amostras/ciclo e contêm componentes na faixa de frequências de 0 a 480Hz, já filtradas as componentes na faixa de frequências de 480Hz a 3.840Hz pelos filtros wavelet de primeira, segunda e terceira escalas.

As figuras 3 e 4 apresentam os sinais das tensões e correntes de fase (os sinais originais), para uma falta FTB a 25% da LT PDD/BEA, e as figuras 5 e 6, respectivamente, mostram suas versões aproximadas na terceira escala (os sinais de 3<sup>a</sup> escala). Ao comparar as figuras 3 e 5, observa-se, claramente, a remoção das componentes de mais alta frequência nos sinais originais de fase das tensões.

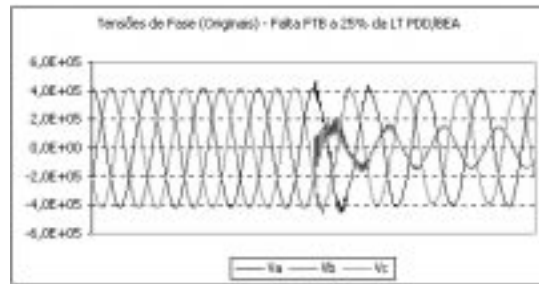


Figura 3: Sinais das Tensões de Fase para uma Falta FTB a 25% da LT PDD/BEA.

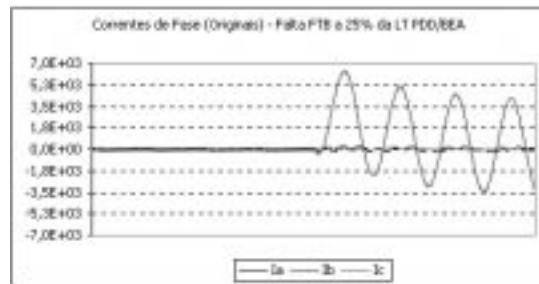


Figura 4: Sinais das Correntes de Fase para uma Falta FTB a 25% da LT PDD/BEA.

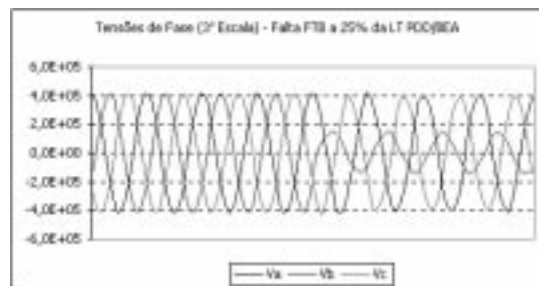


Figura 5: Aproximação dos Sinais das Tensões de Fase a Terceira Escala para uma Falta FTB a 25% da LT PDD/BEA.

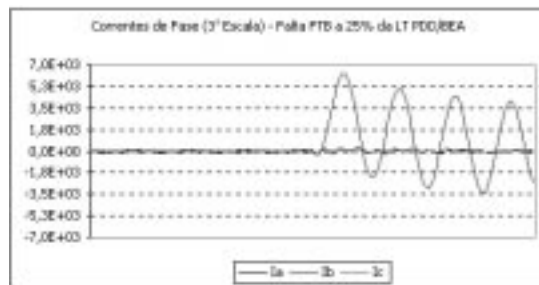


Figura 6: Aproximação dos Sinais das Correntes de Fase a Terceira Escala para uma Falta FTB a 25% da LT PDD/BEA.

Baseado no exposto, é possível estabelecer uma alternativa para a localização de faltas, onde uma estimativa da distância da falta pode ser obtida ao considerar o método da impedância aparente, que consiste na determinação da impedância “vista” pelo terminal de monitoramento, quando da ocorrência da falta. Para a implementação deste método, considera-se que as componentes fundamentais dos sinais de tensão e corrente são obtidas ao extrair as componentes fundamentais dos sinais de 3<sup>a</sup> escala.



#### 4.2 Determinação da Impedância de Falta

Quando uma falta envolve mais de uma fase, a impedância de falta pode ser obtida por [Warrington, 1968]:

$$Z_{Falta} = \frac{V_X - V_Y}{I_X - I_Y},$$

onde  $Z_{Falta}$  é a impedância de seqüência positiva “vista” pelo terminal de monitoramento, e  $X$  e  $Y$  são as fases envolvidas na falta. No caso de faltas FFF podem ser empregadas quaisquer das combinações: fases A e B, fases A e C ou fases B e C.

No caso de faltas FT, a impedância de falta pode ser obtida por [Warrington, 1968]:

$$Z_{Falta} = \frac{V_X}{I_X + I_0 \cdot (k-1)}, \text{ para } k = \frac{Z_0}{Z_1},$$

onde  $Z_{Falta}$  é a impedância de seqüência positiva “vista” pelo terminal de monitoramento,  $X$  é a fase envolvida na falta,  $I_0$  é a corrente de seqüência zero que circula a partir do terminal de monitoramento em direção ao ponto de falta, e  $Z_0$  e  $Z_1$  são, respectivamente, a impedância de seqüência zero e de seqüência positiva da linha de transmissão.

Estas expressões fornecem uma impedância de seqüência positiva e, portanto, a distância da falta  $D_F$ , em relação ao terminal de monitoramento, pode ser estimada por:

$$D_F = \frac{Z_{Falta}}{Z_1}.$$

#### 4.3 Método de Análise

Para validar os resultados, optou-se por comparar os erros obtidos ao estimar as distâncias considerando tanto as componentes fundamentais dos sinais de 3ª escala, *3a. Escala*, quanto dos sinais originais, *Orig.*, obtidos em PDD.

O erro relativo  $Erro_{LT}$  cometido na localização de uma falta é expresso, geralmente, em relação ao comprimento da linha de transmissão,  $D_{LT}$ . Portanto, tem-se que:

$$Erro_{LT} = \frac{D_F - D_{Exato}}{D_{LT}}.$$

Na estimativa das distâncias, considerou-se que a impedância de falta, para ambos casos, foi obtida através da implementação de um algoritmo de janela fixa de um ciclo. Porém, como os primeiros quatro ciclos correspondem à condição pré-falta, a impedância de falta foi calculada apenas para os quatro últimos ciclos.

### 5 Resultados das Simulações

Apesar de terem sido simuladas faltas a 25%, 50% e 75% do comprimento da LT PDD/BEA estão

apresentados, nas tabelas III, IV, V e VI, apenas os erros obtidos para faltas a 25%.

No caso de faltas FFF, a determinação das distâncias foi obtida ao considerar as três combinações de fases: AB; AC, e BC.

Tabela III: Erros Obtidos para Faltas Fase-Terra a 25% da LT PDD/BEA.

Janela	FTA25		FTB25		FTC25	
	3a. Escala	Orig.	3a. Escala	Orig.	3a. Escala	Orig.
5	2,0%	2,4%	2,8%	3,2%	-0,7%	-0,5%
6	0,8%	0,9%	1,6%	1,7%	-0,1%	0,0%
7	0,6%	0,6%	1,1%	1,1%	0,2%	0,2%
8	1,3%	0,5%	1,5%	0,9%	0,8%	0,4%
Média	1,2%	1,1%	1,7%	1,7%	0,1%	0,0%

Tabela IV: Erros Obtidos para Faltas Fase-Fase a 25% da LT PDD/BEA.

Janela	FFAB25		FFAC25		FFBC25	
	3a. Escala	Orig.	3a. Escala	Orig.	3a. Escala	Orig.
5	1,8%	3,4%	0,1%	1,5%	0,1%	0,2%
6	0,9%	0,9%	-0,4%	-0,4%	0,1%	0,2%
7	0,7%	0,8%	-0,3%	-0,2%	0,1%	0,2%
8	2,2%	0,6%	1,0%	-0,2%	0,5%	0,2%
Média	1,4%	1,4%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%

Tabela V: Erros Obtidos para Faltas Fase-Fase-Terra a 25% da LT PDD/BEA.

Janela	FFTAB25		FFTAC25		FFTBC25	
	3a. Escala	Orig.	3a. Escala	Orig.	3a. Escala	Orig.
5	1,8%	3,4%	0,1%	1,5%	0,1%	0,2%
6	0,9%	0,9%	-0,4%	-0,4%	0,1%	0,2%
7	0,7%	0,8%	-0,3%	-0,2%	0,1%	0,2%
8	2,2%	0,6%	1,0%	-0,2%	0,5%	0,2%
Média	1,4%	1,4%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%

Tabela VI: Erros Obtidos para Faltas Fase-Fase-Fase a 25% da LT PDD/BEA.

Janela	FFF25 (AB)		FFF25 (AC)		FFF25 (BC)	
	3a. Escala	Orig.	3a. Escala	Orig.	3a. Escala	Orig.
5	1,8%	3,4%	0,1%	1,5%	0,1%	0,2%
6	0,9%	0,9%	-0,4%	-0,4%	0,1%	0,2%
7	0,7%	0,8%	-0,3%	-0,2%	0,1%	0,2%
8	2,2%	0,6%	1,0%	-0,2%	0,5%	0,2%
Média	1,4%	1,4%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%

Quando da ocorrência de faltas FFF observa-se que são obtidos melhores resultados ao fazer uso dos sinais das tensões e correntes das fases B e C. Apesar disto, não se pode afirmar que isto será sempre verdadeiro, uma vez que a falta foi simulada quando a tensão da fase A atingia seu valor máximo.

Os resultados obtidos com os sinais de 3ª escala podem ser considerados satisfatórios por terem sido similares àqueles obtidos no emprego dos sinais originais, mesmo considerando as 16 amostras/ciclo, do primeiro método, ao invés das 128 amostras/ciclo deste último. Em alguns casos, os erros observados foram, inclusive, menores, ainda que não tenha sido possível identificar uma janela de amostragem que forneça a melhor estimativa da localização da falta.

## 6 Conclusões

Quando se dispõe de instrumentos de monitoração com pequena taxa de amostragem, os métodos para localização de faltas em linhas de transmissão devem ficar restritos àqueles que consideram as componentes à frequência fundamental.

O método ora proposto considera a decomposição dos sinais de fase das tensões e correntes amostrados a 128 amostras/ciclo em três escalas do processo de codificação por sub-bandas. Uma estimativa da localização da falta é obtida ao fazer uso do método da impedância aparente, onde são utilizadas como componentes à frequência fundamental as versões aproximadas dos sinais de tensão e corrente à terceira escala. Nesta escala, os sinais são representados por 16 amostras/ciclo, tendo sido removidas as componentes na faixa de frequências de 480 a 3.840Hz. Os resultados obtidos nas simulações apresentaram erros inferiores a 3,7% (pior caso, falta FTB a 75%), o que pode ser considerado satisfatório para reduzir a área de inspeção por parte das equipes de manutenção, favorecendo o rápido restabelecimento do sistema de potência.

## Agradecimentos

O primeiro autor agradece o suporte financeiro da CAPES, essencial para o desenvolvimento desta pesquisa.

## Referências Bibliográficas

- Daubechies, I. (1992). *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, PA: SIAM, 357p. 1992.
- Magnago, F. H., Abur, A. (1998). *Fault Location Using Wavelets*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, pp. 1475-1480, October 1998.
- Magnago, F. H., Abur, A. (2000). *Use of Time Delays between Modal Components in Wavelet based Fault Location*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 22, Issue 6, 2000, pp. 397-403.
- Mallat, S. G. (1989). *A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 7, pp. 674-693. July 1989.
- Ramos, A. J. P. (2000a). *Monitoração, Avaliação e Controle da Qualidade da Energia Elétrica – Relatório Parcial 2: Protocolo de Medição e Monitoração*. Relatório Técnico ANEEL. Recife, PE: Maio 2000.
- Ramos, A. J. P. (2000b). *Identificação de Registradores no Mercado e Definição de Características Básicas Requeridas – Relatório Final 5*. Relatório Técnico ANEEL. Recife, PE: Dezembro 2000.
- Silveira, P. M., Seara, R., Zürn, H. H. (2001). *Localização de Faltas por Ondas Viajantes – Uma Nova Abordagem Baseada em Decomposição Wavelet*. CD-ROM do XVI SNPTEE. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Campinas, SP: CTEEP/EPTE, Outubro 2001. GPC/027.
- Soares, L. R. (2001). *Wavelets na Identificação e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão*. Recife, PE: Dezembro 2001. 171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco.
- Warrington, A. R. van C. (1968). *Protective Relays: their Theory and Practice*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc. Vol 1. 2 ed. 1968.
- Yibin, X., Wai, D. C. T., Kérthipala, W. W. L. (1997). *A New Technique Using Wavelet Analysis for Fault Location*. In: Sixth International Conference on Developments in Power System Protection, 1997, Publication No. 434, pp. 231-234, IEE, 1997.