



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil

Tópico:

Sistemas de Monitoramento e Tratamento de Dados

WAVELETS NA DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Luciana R. Soares *

Hélio M. de Oliveira

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Depto. de Eletrônica e Sistemas – DES

RESUMO

Este artigo apresenta um algoritmo para a detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão, com base na transformada de wavelets e na representação multirresolução de sinais, que possa vir a ser implementado em uma central de análise ou em um instrumento de monitoração para avaliação da qualidade da energia elétrica. Para tanto foram realizadas simulações de falta em uma linha de transmissão em 500kV, considerando-se sinais de fase das tensões e correntes obtidos em apenas um dos terminais da linha de transmissão, a taxa de 128 amostras/ciclo.

PALAVRAS-CHAVE

Detecção de Faltas. Classificação de Faltas. Localização de Faltas. Transformada de Wavelets. Representação Multirresolução.

1.0 - INTRODUÇÃO

A avaliação da qualidade da energia elétrica (QEE) constitui-se em uma constante preocupação das empresas de energia elétrica, uma vez que sua degradação acarreta em prejuízos técnicos e financeiros significativos, principalmente quando envolvem consumidores industriais e empresas detentoras de processos produtivos automatizados. Estes processos, geralmente, são constituídos por dispositivos eletro-eletrônicos sensíveis, e portanto, vulneráveis a ocorrência de transitórios eletromagnéticos.

Dos fenômenos eletromagnéticos que podem afetar mais drasticamente os processos industriais destacam-se as variações de tensão de curta duração (VTCDs), causadas, principalmente, por faltas no sistema de fornecimento de energia elétrica [1].

A transformada de wavelets tem se mostrado uma ferramenta matemática bastante eficiente na análise de sinais em sistemas de potência [2]. Uma de suas maiores vantagens é permitir a análise local das características dos sinais em análise através de sua representação simultânea em dois domínios: tempo e frequência [3, 4]. Com isto, os sinais de falta podem ser decompostos em faixas de frequências distintas, através das quais é possível analisar o comportamento de suas componentes na faixa de frequência desejada.

Este trabalho apresenta os resultados obtidos em simulações de faltas em uma linha de transmissão em 500kV, visando o desenvolvimento de um algoritmo para a detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão, com base na transformada de wavelets e na representação multirresolução de sinais. O desenvolvimento de um algoritmo que possa vir a ser implementado em um instrumento de monitoração da QEE, como o registrador digital de perturbação (RDP), ou em uma central de análise pode resultar na redução de investimentos das empresas do setor que, dispondo de um RDP instalado em um ponto do sistema para monitoramento de uma linha de transmissão, não mais necessitariam investir na

* Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n. UFPE/CTG/DES - Sala 403. CEP 50.740-530 - Recife - PE - BRASIL
Tel.: +55 (081) 3271-8213 - FAX: +55 (081) 3271-8739 - E-mail: lusoares@ufpe.br

aquisição de um dispositivo com a função específica de localizar faltas nesta linha de transmissão.

2.0 - ANÁLISE DE FALTAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

A implementação de algoritmos para promover a detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão depende da configuração do sistema de monitoramento dos sinais de tensão e/ou corrente na linha de transmissão e da taxa de amostragem empregada pelos instrumentos de monitoração.

Quando se considera um sistema para monitoramento da qualidade da energia elétrica, a escolha por algoritmos baseados em técnicas *single-ended* prevalece, pois, em geral, a aquisição dos sinais de tensão e/ou corrente ocorre em apenas um dos terminais da linha de transmissão. Em função das baixas taxas de amostragem disponíveis em instrumentos de monitoração da QEE [5], a escolha por métodos baseados nas componentes à frequência fundamental é mais adequada para localizar faltas em linhas de transmissão [6].

2.1 Características do Sistema em Análise

O sistema em estudo consiste de uma linha de transmissão em 500kV, pertencente à interligação Norte/Nordeste, a LT Presidente Dutra/Boa Esperança (LT PDD/BEA), com 205,6 km de comprimento.

A Figura 1 apresenta o diagrama simplificado utilizado nas simulações, onde Z_{LT} e D_{LT} são a impedância e o comprimento da linha de transmissão, Z_{e1} e Z_{e2} são, respectivamente, a impedância do equivalente Thevenin nos terminais de PDD e BEA; E_{e1} e E_{e2} são, respectivamente, as fontes de tensão do equivalente Thevenin nestes mesmos terminais.

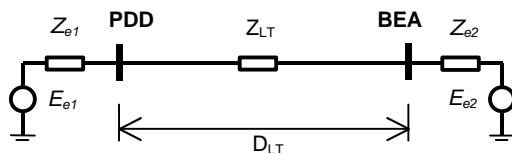


Figura 1: Diagrama simplificado utilizado para as simulações de falta na linha de transmissão.

2.2 Considerações sobre as Simulações

As faltas foram simuladas no ATP (*Alternative Transient Program*), considerando que o monitoramento da linha é realizado no terminal de

PDD, onde são registradas as formas de onda das tensões e correntes de fase para cada uma das faltas simuladas. No ATP foi considerado um período de simulação de oito ciclos, não havendo a atuação de sistemas de proteção para a eliminação da falta, e um intervalo de amostragem de 65,10 μ s, sendo em seguida, os sinais re-amostrados a taxa de 128 amostras/ciclo.

Considera-se o modelo a parâmetros distribuídos, à frequência constante, para a representação da linha de transmissão, e que a mesma é totalmente transposta. Seus parâmetros estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros distribuídos da LT PDD/BEA.

Seqüência	Parâmetros da LT PDD/BEA		
	R (Ω /km)	L (mH/km)	C (nF/km)
Positiva	0,0246	0,8539	13,66
Zero	0,3818	3,732	8,61

As faltas foram simuladas em três etapas: (1) ocorrência das faltas a 4 ciclos do início das simulações, quando a tensão da fase *a* atinge o valor máximo; (2) a 41/8 ciclos, e (3) a 41/4 ciclos, quando a tensão da fase *a* passa por zero. Nos três casos, considerou-se impedância de falta nula.

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.

3.0 - MULTIRRESOLUÇÃO E WAVELETS

3.1 A Representação Multirresolução

A representação multirresolução de sinais permite decompor um sinal $\{f(k)\} \in 1^2$ (1^2 : espaço de sinais discretos de energia finita) em escalas, onde em cada escala j é possível obter uma aproximação do sinal original ($N=2^j$). Como esta representação é realizada de forma aproximada, pode-se obter as versões aproximadas do sinal original $\{f(k)\}$ através do uso de filtros passa-baixa [4].

3.2 A Transformada de Wavelets

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

$$d_{m,n} = a_0^{-m/2} \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k) \cdot y(a_0^{-m} \cdot k - n \cdot b_0), \quad (1)$$

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

Quando $a_0 = 2$, $b_0 = 1$ e $y(t)$, a wavelet-mãe, gera uma base ortonormal no L^2 obtém-se a mais utilizada das construções, chamada de transformada de wavelets diádica [3].

Uma implementação computacional bastante eficiente desta transformada pode ser obtida através de algoritmos baseados na codificação por sub-bandas [4].

3.3 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 Multirresolução (RWM) [4].

Na RWM, a teoria de wavelets e a teoria da representação multirresolução 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, que constituem-se, respectivamente, em filtros passa-baixa e passa-faixa.

A Figura 2 ilustra o processo de representação do algoritmo de codificação por sub-bandas baseada na RWM, considerando 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.

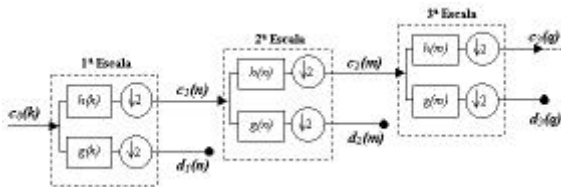


Figura 2: Decomposição do sinal $c_0(k)$ em três escalas. $c_j(\cdot)$ e $d_j(\cdot)$ representam, respectivamente, as versões aproximada e detalhada de $c_0(k)$ na escala j .

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 freqüências reduzidos à metade, em relação aos sinais à escala j .

A implementação deste algoritmo, considerando “Daubechies-4” como wavelet-mãe e três escalas de decomposição, permite decompor um sinal amostrado à taxa de 128 amostras/ciclo em seis faixas de freqüência, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Faixas de freqüências nas escalas de decomposição do algoritmo de codificação por sub-bandas baseado na RWM para um sinal amostrado à taxa de 128 amostras/ciclo.

Escala	Quant. de Amostras por ciclo	Filtro Escala (Hz)	Filtro Wavelet (Hz)
1	64	0 – 1.920	1.920 – 3.840
2	32	0 – 960	960 – 1.920
3	16	0 – 480	480 – 960

De acordo com a Tabela 2, observa-se que na primeira escala pode-se selecionar dos sinais de falta, as componentes de mais alta freqüência do sinal em análise, na faixa de 1.920Hz a 3.840Hz, e na terceira escala, as componentes na faixa de freqüências de 0 a 480Hz, representadas por 16 amostras/ciclo, que corresponde à taxa de amostragem mínima recomendada para a análise de sinais de falta e para a determinação da magnitude de VTCDs [7, 8].

4.0 - DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA EM WAVELETS E MULTIRESPOLUÇÃO

4.1 Detecção e Identificação do Instante de Tempo da Ocorrência da Falta

Os sinais de fase das tensões oriundos das simulações no ATP, obtidos em PDD, são transformados para o domínio modal, segundo a matriz de transformação de Clarke:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_a \\ v_b \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde v_a , v_b e v_c são as tensões de fase e v_0 , v_α e v_β são as componentes modais das tensões.

As componentes modais, na primeira escala de decomposição do algoritmo baseado na RWM, são utilizadas como variáveis na detecção de faltas em linhas de transmissão. O uso de apenas duas destas componentes é viável desde que

sejam empregadas as componentes 0 e β ou α e β , conforme tabela 3 [9].

Tabela 3: Condições para o uso das componentes modais na detecção de faltas em linhas de transmissão.

Componente	Restrição
0	Não detecta faltas sem terra
α	Não detecta faltas FFBC
β	Não detecta faltas FTA
0 e α	Não detecta faltas FFBC
0 e β	Sem Restrição
α e β	Sem Restrição
0, α e β	Sem Restrição

O uso das componentes α e β apresenta como vantagem a imediata classificação de faltas FTA, quando a componente de modo α é sensibilizada pela falta e a componente de modo β não o é, e de faltas FFBC, quando a componente de modo β é sensibilizada pela falta e a componente de modo α não o é. Para fazer uso desta característica é necessário avaliar o comportamento destas componentes em condição normal de operação e sob falta, para então determinar o limiar a ser adotado para a detecção de uma falta. A detecção da falta ocorre quando o valor absoluto dos coeficientes wavelet de primeira escala da tensão de modo α , ou de modo β , ultrapassa este limiar.

A componente de modo 0 desempenha um papel importante após a detecção de uma falta, permitindo determinar se houve o envolvimento da terra na falta. Como resultado das simulações de faltas que não envolviam a terra foram obtidos valores da ordem de 10^{-2} , para o máximo valor absoluto dos coeficientes wavelet de primeira escala da tensão de modo 0. Porém, neste caso também há necessidade de determinar um limiar baseado na condição normal de operação e sob falta, para que o algoritmo não informe erroneamente o envolvimento da terra em uma falta bifásica, por exemplo.

O emprego das componentes de modos α e β também permite identificar corretamente o instante de tempo quando a falta teve início. Como α e β têm a mesma velocidade de propagação, a detecção de uma falta, geralmente, ocorre no mesmo instante de tempo, quando ambas componentes são sensibilizadas pela falta, caracterizado pelo menor instante de tempo obtido entre elas. Isto não ocorre necessariamente para a componente de modo 0. Para a determinação do início da falta é necessário identificar o ponto onde ocorre a primeira variação brusca nos coeficientes wavelet de primeira escala destas componentes modais.

4.2 Classificação de Faltas na LT PDD/BEA

Uma proposta inicial para o algoritmo de classificação de faltas estava baseada no conteúdo de energia dos coeficientes wavelet de primeira escala das tensões de fase e de suas componentes modais [9]. Porém, simulações recentes identificaram a dependência deste algoritmo com o ângulo de incidência da falta.

Baseado no estudo de propagação de ondas (transitórios) durante a ocorrência de faltas e na análise dos coeficientes wavelet de primeira escala das tensões de fase foi possível desenvolver uma nova metodologia, que se mostrou invariante ao ângulo de incidência.

Quando não há o envolvimento da terra na falta, a propagação das componentes de alta frequência ocorre apenas nas fases envolvidas na falta. Com isto, o envolvimento de uma fase em uma falta é caracterizado quando o valor máximo dos coeficientes wavelet de primeira escala da tensão é superior a um determinado limiar.

No caso de faltas com o envolvimento da terra, ocorre propagação das componentes de alta frequência nas três fases, e a imposição de um limiar não é adequado. Neste caso, para identificar as fases envolvidas na falta verifica-se a magnitude da impedância de fase ($|Z_i| = |V_i|/|I_i|$, para $i = a, b$ e c), através dos fasores de tensão e corrente para o ciclo subsequente ao início da falta. Se a magnitude da impedância de uma fase é inferior a um determinado limiar, esta fase fica caracterizada como envolvida na falta. A escolha deste limiar deve levar em consideração o comprimento da linha de transmissão e as condições de operação em carga máxima e leve no terminal de monitoramento.

4.3 Localização de Faltas na LT PDD/BEA

Dentre os aspectos que afetam uma boa estimativa da localização da falta estão as componentes de alta frequência e a componente exponencial contínua, presentes nos sinais de tensão e corrente quando da ocorrência de uma falta [10]. Por se tratarem de componentes não periódicas, elas comprometem a determinação das componentes fundamentais destes sinais através de sua decomposição em séries de Fourier.

O efeito das componentes de alta frequência pode ser eliminado/reduzido ao considerar as versões aproximadas de terceira escala dos sinais de tensão e corrente de fase obtidos no terminal de monitoramento [11]. Na estimativa

das distâncias, considera-se a determinação da impedância aparente de falta para os quatro últimos ciclos do período de simulação, através da implementação de algoritmo de janela fixa de um ciclo, atualizável a cada ciclo [11]. A presença da componente exponencial contínua nos sinais de tensão e corrente conduz a um maior percentual do erro na determinação da distância da falta. O desenvolvimento de um filtro digital que rejeite a componente de frequência nula pode consistir em um aprimoramento do método proposto. Porém, isso só se justifica caso haja uma significativa redução do erro cometido na determinação da distância da falta.

A figura 3 apresenta os sinais das correntes de fase (3ª. escala), para uma falta FTB a 25% da LT PDD/BEA. Observa-se, claramente, o decaimento exponencial da corrente da fase envolvida na falta.

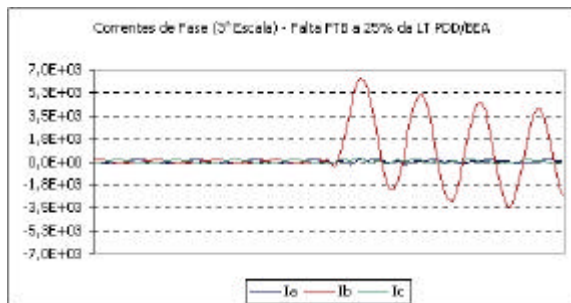


Figura 3: Sinais das Correntes de Fase para uma Falta FTB a 25% da LT PDD/BEA.

Em [10, 12] são apresentadas propostas para a filtragem desta componente através da modelagem da corrente de falta. Estas técnicas serão analisadas visando melhorar a precisão do algoritmo para localização da falta.

4.4 Determinação do afundamento de tensão decorrente da falta

Como não foi considerada a eliminação da falta por dispositivos de proteção, a determinação da duração da falta não pode ser obtida, e portanto, não é possível a completa caracterização da VTCD decorrente da falta.

Vale salientar que não foi verificada elevação de tensão nas fases sãs quando da ocorrência de faltas fase-terra, tendo sido registrados apenas afundamento de tensão na fase envolvida na falta.

A magnitude de um afundamento de tensão é representada pelo valor mínimo da tensão RMS, consideradas as três fases, podendo ser obtida através de algoritmo de janela fixa de 1 ciclo atualizada a cada ciclo [8, 13]:

$$V_{i(j)} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N [v(k)]^2}, \quad i = a, b \text{ e } c \quad (3)$$

onde $V_{i(j)}$ corresponde ao valor RMS da tensão fase-neutro da fase i na janela j e N é a quantidade de amostras em um ciclo.

A tabela 4 apresenta os valores mínimos obtidos nas últimas quatro janelas de amostragem para as tensões de fase em PDD, em p.u., quando da ocorrência de faltas trifásicas a 25% e 75% da LT PDD/BEA. Em negrito, a magnitude do afundamento de tensão para caracterização da VTCD.

Tabela 4: Magnitude do afundamento de tensão decorrente de faltas FFF na LT PDD/BEA.

Janela	FFF25			FFF75		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
5	0,178	0,210	0,381	0,423	0,418	0,595
6	0,176	0,176	0,175	0,421	0,400	0,392
7	0,176	0,176	0,176	0,395	0,394	0,386
8	0,178	0,178	0,178	0,404	0,395	0,401

Incidência da Falta: (1) 4 ciclos; (2) 41/8 ciclos; (3) 41/4 ciclos.

5.0 - CONCLUSÕES

Considera-se a implementação do algoritmo de codificação por sub-bandas baseado na Representação Wavelet Multirresolução, com "Daubechies 4" como wavelet-mãe, para a análise de sinais de falta aquisitados em um dos terminais da linha de transmissão a uma taxa de amostragem de 128 amostras/ciclo.

As componentes de alta frequência dos sinais de falta, no domínio modal, são utilizadas para a detecção de faltas na linha de transmissão. O emprego das componentes de modos α e β para a detecção de faltas permite realizar a classificação imediata de faltas FTA e FFBC, quando apenas uma destas componentes é sensibilizada pela falta. Além disto, permite determinar o instante de tempo quando a falta teve início.

Na classificação de faltas que não envolvem a terra, as componentes de alta frequência dos sinais de fase também podem ser utilizadas. No caso de faltas com o envolvimento da terra é necessário o emprego de um algoritmo tradicional para a identificação das fases envolvidas na falta. Neste trabalho foi avaliada a magnitude das impedâncias de fase.

Vale ressaltar que a metodologia para a detecção e classificação de faltas foi elaborada com base nos resultados de simulações de falta para a LT PDD/BEA. Como ainda não foi avaliado o desempenho do algoritmo para a detecção e

classificação de faltas para impedância de falta não nula e outras localizações da falta na linha de transmissão, esta metodologia ainda encontra-se em fase de investigação para futura validação.

A componente exponencial contínua presente nos sinais de falta introduz um erro adicional no algoritmo para a localização de faltas. Portanto, faz-se necessário avaliar técnicas que permitam reduzir seus efeitos visando obter uma melhor estimativa das componentes fundamentais dos sinais de tensão e corrente, e conseqüentemente, da distância da falta.

6.0 - AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece o suporte financeiro da CAPES.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, New York, NY: McGraw-Hill, 1996, 265p.
- [2] C.H. Kim, R. Aggarwal, "Wavelet Transforms in Power Systems. Part 2: Examples of Application to Actual Power System Transients", *Power Engineering Journal*, IEE, August 2001, pp. 193-202.
- [3] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*, Philadelphia, PA: SIAM, 357p, 1992.
- [4] S.G. Mallat, "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.
- [5] A.J.P. Ramos, "Identificação de Registradores no Mercado e Definição de Características Básicas Requeridas – Relatório Final 5", *Relatório Técnico ANEEL*, Recife, PE: Dezembro 2000.
- [6] L.R. Soares, *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.
- [7] A.J.P. Ramos, "Monitoração, Avaliação e Controle da Qualidade da Energia Elétrica – Relatório Parcial 2: Protocolo de Medição e Monitoração", *Relatório Técnico ANEEL*, Recife, PE: Maio 2000.
- [8] T.N. Ribeiro, E. Mertens, D.O.C. Brasil, D.M. Correia, "Variações de Tensão de Curta Duração – Esforços Conjugados do ONS, ANEEL e Agentes", *IV Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Porto Alegre, RS: Agosto 2001, pp. 409-414.
- [9] L.R. Soares, H.M. de Oliveira, M.A. de Carvalho Júnior, "Detecção e Classificação de Faltas utilizando a Transformada de Wavelets", *aceito, XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Uberlândia, MG: Outubro 2003.
- [10] E.C. Senger, N.N. Santana, "Pré-Filtragem da Componente Aperiódica Exponencial para os Algoritmos Utilizados em Relés de Distância", *VI Seminário Técnico de Proteção e Controle*, Natal, RN: Outubro 1998.
- [11] L.R. Soares, M.A. de Carvalho Júnior, H.M. de Oliveira, "Localização de Faltas em Linhas de Transmissão utilizando a Representação Wavelet Multiresolução", *XIV Congresso Brasileiro de Automática*, CD-ROM, Natal, RN: Setembro 2002.
- [12] M.S. Sachdev, M.A. Nagpal, "Recursive Least Squares Algorithm for Power System Relaying and Measurement Applications", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 3, pp. 1008-1015, 1991.
- [13] N.M. Matsuo, N. Kagan, S.X. Duarte, E.L. Ferrari, A. Tenório, U.F. Castellano, J.L. Cavaretti, "Respostas de Diferentes Protocolos para Detecção de VMT's e Medição de seus Parâmetros Característicos", *IV Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Porto Alegre, RS: Agosto 2001, pp. 403-408.