



## ESTUDO DE FONTES DE ERRO EM ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

André L. L. Miranda <sup>1*</sup> miranda@cepel.br	Marco A. M. Rodrigues <sup>2</sup> mamr@cepel.br	Eduardo A. B. da Silva <sup>1</sup> eduardo@lps.ufrj.br
Raul Balbi Sollero <sup>2</sup> rbs@cepel.br	Salvatore Mantuano Filho <sup>3</sup> salvator@furnas.com.br	Marco Antônio F. Ramos <sup>3</sup> marcofr@furnas.com.br

(1) COPPE / UFRJ
(2) CEPEL
(3) FURNAS

### RESUMO

Este artigo faz a análise de um algoritmo de localização de faltas baseado em dados de uma extremidade da linha e outro baseado nas duas extremidades para avaliar as possíveis fontes de erro em duas condições distintas: quando a frequência da rede se mantém fixa em 60 Hz e quando existe um pequeno desvio da frequência fundamental. Os resultados encontrados foram interessantes.

### PALAVRAS-CHAVE

Oscilografia, Localização de Faltas, Fasores, Filtro de Fourier

### 1. INTRODUÇÃO

Os algoritmos de localização de faltas são susceptíveis de erros provenientes de uma série de fatores como o valor dos fasores, a impedância da falta, a distância da falta, o tipo de falta, o ângulo de impedância das fontes, o comprimento da linha, entre outros. Um determinado algoritmo pode ser sensível a alguns fatores e robusto em relação a outros.

Este artigo apresenta um estudo de avaliação de dois algoritmos de localização de faltas: O primeiro utiliza medidas em um terminal [1] e o outro utiliza medidas provenientes das duas extremidades da linha de transmissão [2], sendo que ambos estão implementados no programa SINAPE [3].

O trabalho se divide em duas partes: na primeira parte são apresentados indicadores estatísticos que avaliam o desempenho dos algoritmos de localização de faltas para o filtro de Fourier com janela retangular para a frequência da rede em 60 Hz; a segunda parte se encarrega de analisar o efeito da variação de frequência para o cálculo da localização de faltas, utilizando o filtro

de Fourier com janela retangular e triangular [4] para o cálculo de fasores.

### 2. CONJUNTO DE TESTES

Para a avaliação da precisão dos algoritmos de localização de faltas utilizou-se um conjunto de oscilogramas resultantes de simulações onde as condições do curto-circuito e da falta eram tais que o algoritmo de localização utilizando um terminal produzia erros elevados.

Esses oscilogramas foram gerados no ATP simulando o pequeno sistema da Figura 1, variando a impedância da falta, a distância da falta e o ângulo da impedância das fontes. Além disso, o sinal original é reamostrado para que possa representar um sinal da rede elétrica com variação de frequência de  $\pm 0,5$  Hz [5].

Os oscilogramas possuem um trecho de falta longo para que se possam separar os efeitos da medição dos fasores no período transitório (observados apenas nos primeiros ciclos após a falta) dos efeitos do algoritmo de cálculo (observados em todo o trecho de falta). Por esse motivo cada simulação contém dois ciclos de pré-falta e dez ciclos de falta, para que os valores dos fasores de falta se estabilizem.

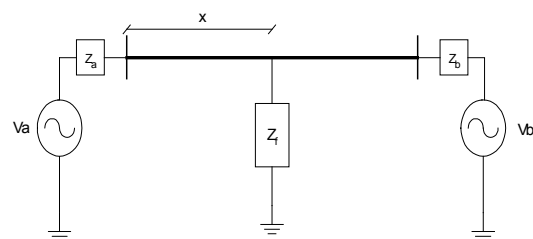


Figura 1 – Sistema simulado

\*Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia / UFRJ – Programa de Engenharia Elétrica  
Cx. Postal: 68007 – Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ - CEP: 21945-970

## 2.1 As curvas utilizadas

Os experimentos utilizaram o conjunto de oscilogramas mostrados na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Casos simulados

CASOS	TIPO	Lado	Distância (Km)
<b>01 - Lcvar 02a:</b>			
SIST. FRACO/FORTE – Falta a 60%	A-N	1	60
		2	40
<b>02 - Lcvar 02b:</b>			
SIST. FRACO/FORTE – Falta a 75%	A-N	1	75
		2	25
<b>03 - Lcvar 02c:</b>			
SIST. FRACO/FORTE – Falta a 90%	A-N	1	90
		2	10
<b>04 - teste1 100:</b>			
100 km, 90%, Rf=40 Ohms - s(88 graus)/r(80 graus)	A-N	1	90
		2	10
<b>05 - teste1 100b:</b>			
100 km, 50%, Rf=40 Ohms - s(88 graus)/r(80 graus)	A-N	1	50
		2	50
<b>06 - teste3 100:</b>			
Fonte s (85 graus) / Fonte r (80 graus)	A-N	1	90
		2	10
<b>07 - teste4:</b>			
100 km, 40%, Rf=40 Ohms - s(88 graus)/r(80 graus)	A-N	1	40
		2	60
<b>08 - teste5:</b>			
100 km, 60%, Rf=40 Ohms - s(88 graus)/r(80 graus)	A-N	1	60
		2	40
<b>09 - teste6:</b>			
100 km, 30%, Rf=40 Ohms - s(88 graus)/r(80 graus)	A-N	1	30
		2	70
<b>10 - teste7:</b>			
100 km, 70%, Rf=40 Ohms - s(88 graus)/r(80 graus)	A-N	1	70
		2	30
<b>11 - teste8:</b>			
Fonte s (85 graus) / Fonte r (80 graus) a 40%	A-N	1	40
		2	60
<b>12 - teste9:</b>			
Fonte s (85 graus) / Fonte r (80 graus) a 60%	A-N	1	60
		2	40
<b>13 - teste10:</b>			
Fonte s (85 graus) / Fonte r (80 graus) a 30%	A-N	1	30
		2	70
<b>14 - teste11:</b>			
Fonte s (85 graus) / Fonte r (80 graus) a 70%	A-N	1	70
		2	30

## 3. ANÁLISE DOS ALGORITMOS PARA FREQUÊNCIA DA REDE FIXA E IGUAL A 60 HZ

### 3.1 Levantamento de estatísticas temporais dos algoritmos

Os valores dos fasores, utilizados no cálculo de distância, são calculados em dois trechos da simulação: nos 2 primeiros períodos após a falta e no final do oscilograma. No primeiro trecho se analisa a influência do erro do cálculo dos fasores no erro do algoritmo de localização de faltas. No segundo, o erro inerente ao algoritmo de localização de faltas.

### 3.2 Cálculo das estatísticas temporais

Este cálculo consiste em:

1. Obter os valores dos fasores através do filtro de Fourier aplicado sobre uma janela deslizante cujo tamanho é de um ciclo da fundamental. A janela desliza amostra a amostra gerando um valor de fasor para cada posição, grandeza e fase.

2. Para cada conjunto de 6 fasores (3 fases e duas grandezas), correspondentes a uma posição da janela deslizante, calcula-se a distância de falta. No trecho após a falta despreza-se o primeiro ciclo para esperar a estabilização do transitório do filtro de Fourier e 0,25 ciclo para garantir um sinal mais estável e, dos dois ciclos iniciais, são utilizados 0,75 ciclo para o cálculo da distância. No trecho final do oscilograma não há necessidade de deslizamento da janela, pois os resultados assim obtidos variam de forma insignificante.

O cálculo da distância é feito de três formas:

1) Pelo algoritmo de um terminal, utilizando as medidas do terminal 1 da linha de transmissão;  
 2) Pelo algoritmo de um terminal, utilizando as medidas do terminal 2 da linha de transmissão;  
 3) Pelo algoritmo de dois terminais, utilizando as medidas em ambas as extremidades.

3. Desenha-se o gráfico, como na Figura 2, da distância calculada da falta em função da posição da janela utilizada.

4. Obtém-se da curva de distância da falta para cada algoritmo os valores de mérito, descritos a seguir:  
 a) Valor médio: média aritmética dos valores de distância de faltas calculados;  
 b) Variância: indica a dispersão dos valores de localização de faltas;

O estudo dos valores de mérito propostos no item 4 é interessante porque é assim que muitos programas de localização de falta trabalham, ou seja, eles simplesmente obtêm o valor do fasor em um momento qualquer após a incidência de falta.

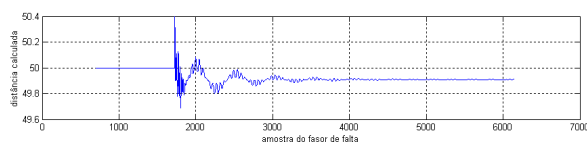


Figura 2 – Curva de distância de falta em função da posição da janela do filtro de Fourier

### 3.3 Avaliação dos resultados para o cálculo de fasores

A Tabela 2 mostra o resultado do valor médio da distância de falta e do valor do erro calculado em função do valor exato (usado na simulação) e do valor obtido na região estabilizada, onde o efeito do transitório da falta não é mais sentido. Os valores de erro são obtidos nos dois primeiros períodos após a falta. A Tabela 2 também mostra a variância calculada apenas nos dois primeiros períodos após a falta.

Observando os resultados mostrados na Tabela 2 conclui-se que, para os casos estudados, o algoritmo de dois terminais obteve melhor desempenho do que o algoritmo de Takagi, independentemente do lado em que é feita a medição. Os erros de fasores no trecho de transição em relação aos erros de algoritmos são mais pronunciados no algoritmo do Takagi.

Como exemplo, observa-se o caso 09 (curva *teste6*). O erro indicado na Tabela 2 para o algoritmo de Takagi foi de 7,0 e 4,7 km. O algoritmo de dois terminais obteve erro de 0,4 km, visivelmente inferior, mesmo calculando no trecho com transitório.

Se analisarmos o erro em relação ao trecho estabilizado para a mesma curva, os valores ficam abaixo de 0,3 km para qualquer algoritmo. Isto corrobora a observação anterior de que o algoritmo de dois terminais é mais robusto ao transitório da falta que o Takagi. Porém, a principal conclusão é de que o erro obtido em relação ao valor simulado é, em maior parte, causado pelas características dos algoritmos de localização de faltas, sendo a influência do erro no Filtro de Fourier, devido ao transitório, pouco significativa.

A colunas de variância da Tabela 2 apenas corroboram o concluído até aqui, pois mostram que o valor esperado da distância calculado em qualquer ponto do trecho de falta está mais próximo do valor correto quando se usa o algoritmo de dois terminais.

A Figura 3 e a Figura 4 mostram um gráfico que indica a probabilidade de o algoritmo encontrar um erro da distância de falta menor ou igual a um determinado valor, sabendo que o ponto do cálculo dos fasores pelo filtro de Fourier estará no segundo ciclo depois da falta. Esse gráfico é obtido a partir dos valores obtidos a cada posição da janela deslizante, citada no item 3.2. Nessas figuras, para o exemplo mostrado, vê-se que existe uma probabilidade maior do que 50% de que o erro no cálculo de localização de falta seja menor do que 1 km, para o algoritmo do Takagi. Para o algoritmo de dois terminais a mesma probabilidade aplica-se a um erro menor do que 0,5 km.

Tabela 2 – Erro da distância de falta em relação ao valor exato e ao valor estabilizado e a variância no trecho imediatamente após a falta dos algoritmos do Takagi e de dois terminais. Todos os valores são em Km.

Caso	TAKAGI LADO A			TAKAGI LADO B			DOIS TERMINAIS		
	Valor Exato	Valor Estabilizado	Variância	Valor Exato	Valor Estabilizado	Variância	Valor Exato	Valor Estabilizado	Variância
1	1,25	0,87	3,38	0,59	0,65	1,76	0,12	0,16	0,06
2	1,63	1,08	4,62	0,34	0,39	0,59	0,45	0,03	0,02
3	2,06	1,16	5,15	0,08	0,13	0,07	0,61	0,08	0,04
4	26,46	0,72	0,29	2,16	0,07	0,00	0,53	0,00	0,01
5	9,98	0,38	0,18	3,51	0,10	0,15	0,04	0,05	0,01
6	16,25	0,65	0,17	1,79	0,08	0,00	0,49	0,00	0,01
7	8,31	0,33	0,16	4,03	0,17	0,27	0,18	0,07	0,02
8	12,22	0,43	0,21	3,07	0,04	0,06	0,25	0,03	0,01
9	7,04	0,28	0,11	4,67	0,26	0,48	0,43	0,11	0,03
10	15,32	0,50	0,24	2,70	0,02	0,02	0,41	0,01	0,01
11	3,35	0,33	0,09	2,47	0,08	0,21	0,16	0,04	0,01
12	5,96	0,42	0,13	2,13	0,01	0,05	0,23	0,01	0,00
13	2,55	0,29	0,06	2,67	0,12	0,36	0,37	0,07	0,01
14	8,13	0,46	0,13	1,99	0,05	0,02	0,37	0,01	0,01
Erro Médio	8,61	0,56		2,30	0,15		0,33	0,05	

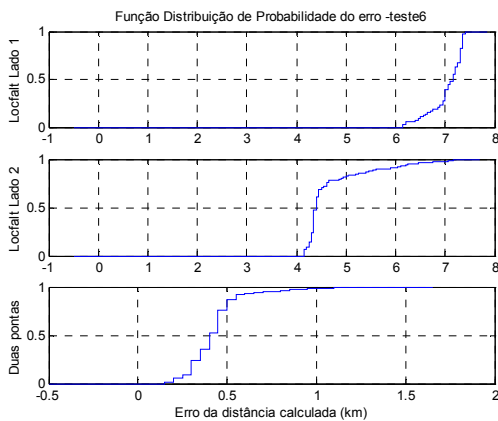


Figura 3 – Função distribuição de probabilidade do erro da localização de faltas em relação ao valor exato

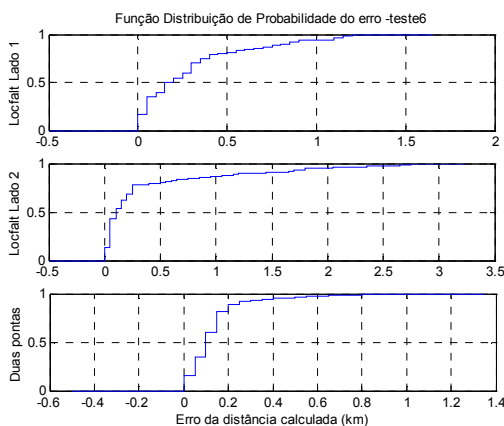


Figura 4 - Função distribuição de probabilidade do erro da localização de faltas em relação ao valor estabilizado

### 3.4 Avaliação dos erros dos algoritmos

A Tabela 3 mostra o resultado do valor médio da distância de falta calculada no último ciclo do oscilograma e o erro em relação ao valor exato da localização de faltas. A distância e o erro são medidos em quilômetros. Como neste trecho o sistema já se estabilizou, a variância no valor da localização de faltas tem, nessa região, um valor desprezível e portanto não foi apresentada.

Tabela 3 - Erro da distância de falta em relação ao valor exato dos algoritmos do Takagi e de dois terminais calculadas na região estabilizada

Caso	TAKAGI LADO A	TAKAGI LADO B	DOIS TERMINAIS
1	0,38	0,06	0,27
2	0,55	0,05	0,47
3	0,90	0,05	0,53
4	27,18	2,23	0,53
5	10,36	3,41	0,09
6	16,90	1,87	0,49
7	8,64	3,86	0,11
8	12,65	3,03	0,28
9	7,32	4,41	0,32

Caso	TAKAGI LADO A	TAKAGI LADO B	DOIS TERMINAIS
10	15,82	2,72	0,42
11	3,68	2,39	0,12
12	6,38	2,14	0,24
13	2,84	2,55	0,30
14	8,59	2,04	0,38
Erro Médio	8,73	2,20	0,33

Os valores apresentados na Tabela 3 também mostram que os erros encontrados durante o trecho transitório são, em grande parte, devidos aos erros dos próprios algoritmos de localização de faltas e não tanto em função do cálculo de fasores.

### 4. ESTUDOS CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

Quando ocorre a variação da frequência da fundamental, a localização de faltas apresenta erros relativos ao cálculo do fasor utilizado nos algoritmos e erros em relação à modelagem da linha de transmissão, visto que os parâmetros de linhas são calculados para a frequência da rede igual a 60 Hz.

Para esse estudo, cada um dos exemplos do conjunto de teste foi reamostrado para simular os sinais com frequências de 59,5 Hz a 60,5 Hz [7]. Para a extração dos valores dos fasores de pré-falta para o algoritmo de localização de faltas em uma extremidade da linha, é necessário calcular a média aritmética do valor dos fasores em um ciclo, pois a natureza oscilatória do sinal na pré-falta se tornaria um fator significativo de erro para este algoritmo.

Quando ocorre variação na frequência da fundamental, aparecem erros de oscilação e de “offset” nos valores dos fasores, mostrado na Figura 5, que se refletem também nos resultados de localização de faltas.

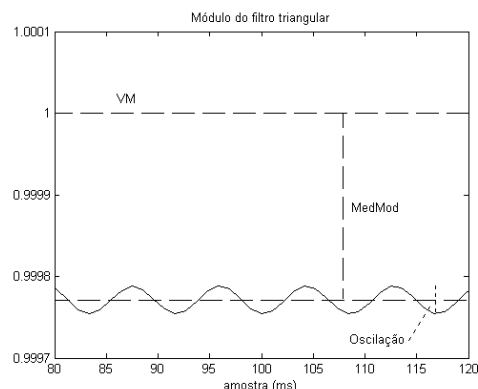


Figura 5 – Gráfico exemplificando a oscilação no módulo

O filtro de Fourier multiplicado pela janela triangular no tempo permite uma redução significativa destes erros, tendo apresentado resultados excelentes no cálculo de fasores [6] e que, a seguir, são confirmados para o algoritmo de localização de faltas.

## 4.1 Resultados

A Tabela 4 abaixo mostra o maior valor alcançado pelo erro médio da distância da localização de falta em todas as frequências analisadas. A Tabela 5 mostra a variância máxima do valor da localização de falta calculada pelo método Takagi nos dois lados e no algoritmo de dois terminais. A Figura 6 mostra os valores das médias e da variâncias do caso 01 em função da frequência.

Tabela 4 – Valor médio do erro

Caso	RETANGULAR			TRIANGULAR		
	TAK. A	TAK. B	DOIS TERM.	TAK. A	TAK. B	DOIS TERM.
1	15,36	1,78	0,27	14,92	1,63	0,28
2	20,80	1,43	0,47	20,21	1,33	0,47
3	29,84	1,13	0,53	29,01	1,08	0,54
4	251,05	16,76	0,53	247,66	16,42	0,53
5	108,30	27,14	0,09	106,19	26,42	0,12
6	228,06	19,90	0,49	225,21	19,51	0,49
7	90,29	31,51	0,11	88,49	30,65	0,12
8	131,18	23,65	0,27	128,73	23,04	0,29
9	75,88	37,03	0,32	74,35	35,99	0,34
10	160,69	20,84	0,42	157,89	20,34	0,43
11	83,83	43,11	0,12	82,40	41,92	0,12
12	120,70	30,05	0,24	118,71	29,29	0,25
13	70,77	53,13	0,30	69,57	51,62	0,31
14	147,19	25,76	0,38	144,89	25,15	0,38

Tabela 5 – Variância

Caso	RETANGULAR			TRIANGULAR		
	TAK. A	TAK. B	DOIS TERM.	TAK. A	TAK. B	DOIS TERM.
1	0,29	1,59E-03	6,60E-08	0,48	1,69E-01	5,98E-03
2	0,51	1,02E-03	1,71E-09	0,82	6,91E-02	2,13E-04
3	0,93	6,15E-04	2,98E-08	1,42	1,35E-02	2,38E-03
4	36,50	8,99E-02	2,62E-08	39,68	1,20E-01	2,49E-03
5	9,81	2,11E-01	2,08E-07	9,40	6,60E-01	1,35E-02
6	25,82	1,14E-01	2,69E-08	29,45	1,64E-01	3,88E-03
7	6,91	2,65E-01	3,40E-07	6,58	9,67E-01	2,43E-02
8	13,90	1,69E-01	1,11E-07	13,50	4,34E-01	5,83E-03
9	4,88	3,37E-01	5,23E-07	4,63	1,38E+00	3,84E-02
10	19,58	1,36E-01	5,18E-08	19,45	2,84E-01	1,35E-03
11	4,51	5,92E-01	1,26E-07	4,64	1,72E+00	1,57E-02
12	9,33	2,29E-01	2,23E-08	9,69	6,88E-01	2,71E-03
13	3,13	1,03E+00	2,10E-07	3,23	2,69E+00	2,63E-02
14	13,35	1,77E-01	2,51E-09	14,09	4,19E-01	2,60E-04

Pode-se observar que quando há variação na frequência fundamental aumentam os erros máximos encontrados para o algoritmo de um lado. Entretanto, o algoritmo de dois lados quase não sofre variações, como pode-se observar comparando a coluna 4 da Tabela 4 com a coluna 4 da Tabela 3.

O uso da janela triangular não melhorou significativamente os erros médios encontrados. Entretanto, no caso da variância, a melhora foi significativa, como se observa na Tabela 4, melhorando a precisão. A associação da janela triangular ao algoritmo de duas pontas reduziu a sensibilidade em relação à variação da frequência

A janela triangular minimiza significativamente o problema da oscilação, visto na Tabela 5, o que é um resultado bastante interessante. Porém, não reduz significativamente o valor médio. Isso nos leva a questionar se esses erros são principalmente devidos ao fato do valor dos parâmetros de linha não ter sido variado em função da variação da frequência fundamental.

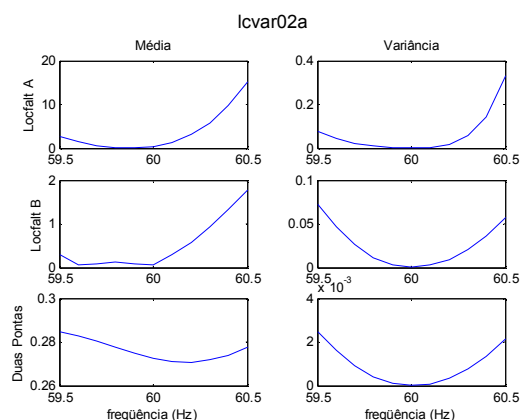


Figura 6 – Média e Variância em função da frequência da rede

## 5. CONCLUSÃO

Este artigo fez a análise do comportamento do algoritmo de Takagi, baseado em dados de uma extremidade da linha, e do algoritmo baseado nas duas extremidades da linha para o caso onde a frequência fundamental era fixa e onde se permitia uma ligeira variação.

No primeiro caso, o resultado do cálculo de localização de faltas é relativamente insensível aos erros no cálculo dos fasores.

No segundo caso, o resultado da localização de faltas para o algoritmo de dois terminais tem uma melhora nos resultados quando a janela triangular é aplicada.

Em particular, os erros excessivos apresentados pelo algoritmo de Takagi são resultado de condições de simulação bastante difíceis, construídas para mostrar situações onde o algoritmo de dois terminais é superior.

Em outras condições menos severas, o algoritmo de Takagi apresentaria desempenho similar ao de dois terminais. Porém, ficou demonstrado que, de forma genérica, o algoritmo de dois terminais é superior, abrangendo um universo maior de condições.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Takagi, T., Yamakoshi, Y., Yamaura, M., Kondow, R., Matsushima, T. – “Development of a New Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data” - *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 8, Aug. 1982, p 2892-8.
- [2] Raul B. Sollero, Marco A. M. Rodrigues, José C. N. Bianco, André L. L. Miranda, Tatiana M. L. Assis, Salvatore M. Filho, “Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão a Partir de Sinais Oscilografados em Ambas as Extremidades da Linha”, *XVI Seminário Nacional de produção e Transmissão de Energia Elétrica - XVI SNPTEE* (Outubro, 2001).
- [3] Carlos A. de M. Aviz e Marco A. M. Rodrigues, “Sistema Integrado de Apoio à Análise de Perturbações – SINAPE”, *Anais do XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE* (1997-Brasil).
- [4] DINIZ, P. S. R., da SILVA, E. A. B., NETTO, S. L., *Digital Signal Processing: System Analysis and Design*. Cambridge University Press, 2002.
- [5] ONS, *Procedimentos de Rede*, Módulo 11 - Proteção e Controle, Revisão 0, 07/07/2000.
- [6] MIRANDA, A. L. L., *Projetos de Filtros Digitais para Análise de Sinais do Sistema Elétrico*. Tese de mestrado, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, fevereiro de 2005.
- [7] MIRANDA, A. L. L., RODRIGUES, M. A. M., DA SILVA, E. A. B. et al., “Cálculo de fasores com taxas não múltiplas da frequência fundamental”. *VII Seminário Técnico de Proteção e Controle (VII STPC)*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 22-27 junho 2003.