



# VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005  
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 01 7744  
Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

## DETERMINAÇÃO DA DURAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA NA TRANSFORMADA WAVELET

FLÁVIO B. COSTA	BENEMAR A. SOUZA	NÚBIA S. D. BRITO	KLEBER M. SILVA	KARCIUS M. C. DANTAS	SANDRA S. B. SILVA
UFCG	UFCG	UFCG	UFCG	UFCG	CHESF

### RESUMO

Um novo método de determinação da duração de faltas em linhas de transmissão é proposto. Regras de detecção são estabelecidas mediante a análise dos sinais de corrente no domínio wavelet. O método é avaliado para situações de faltas reais em diversas linhas de transmissão do sistema Chesf.

### PALAVRAS CHAVES

Transformada wavelet, Faltas, Linhas de transmissão.

### 1.0 INTRODUÇÃO

A complexidade atual do sistema elétrico, aliada às novas cargas e a privatização do setor, tem tornado o mercado de energia cada vez mais competitivo, exigindo eficiência do sistema e qualidade no serviço prestado. Entretanto, eventos inesperados que podem causar interrupção no suprimento de energia reduzem a eficiência e a qualidade do sistema. Dentre as diversas providências que devem ser tomadas para minimizar tais problemas destaca-se a execução da etapa de diagnóstico, que envolve a detecção, classificação e localização do evento.

Um dos eventos de maior impacto no sistema elétrico é a ocorrência de faltas em linhas de transmissão (LT). Em geral, um registro oscilográfico que corresponda a uma falta apresenta três situações, nas quais os sinais de tensão e corrente se comportam de modos

distintos: as etapas de *pré-falta*, *falta* e *pós-falta* (Figura 1).

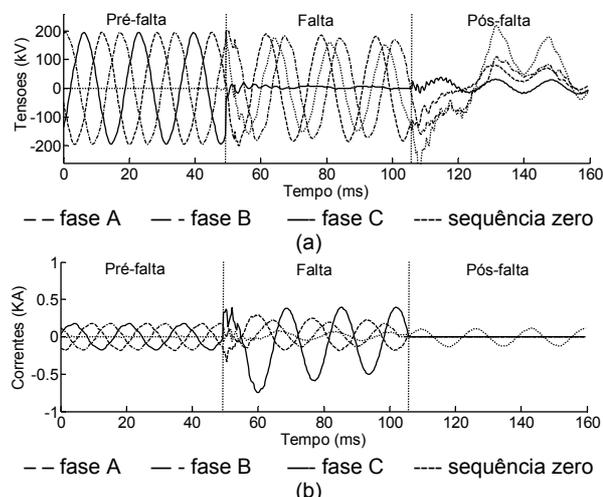


Figura 1 - Registro real de uma falta CT: a) Tensões. b) Correntes.

A etapa de pré-falta consiste nas amostras do registro referentes ao intervalo de tempo no qual o sistema está em operação normal. A segunda etapa consiste no intervalo de tempo no qual o sistema encontra-se em situação de falta. A etapa de pós-falta refere-se à parte do registro que indica o comportamento do sistema após a atuação da proteção.

A identificação e determinação da duração de cada uma dessas etapas não é uma tarefa fácil, o que torna a identificação e classificação a partir de registros oscilográficos um processo difícil.

No momento de transição entre os intervalos de pré-falta, falta e pós-falta, os sinais de tensão e corrente nas LT apresentam uma porcentagem alta de componentes de alta frequência. A amplitude desses componentes é reduzida gradativamente, a depender de fatores como a impedância da falta, sua localização e o nível de carga do sistema. Essa característica não estacionária é uma indicação de que técnicas de processamento digital de sinais baseadas na transformada wavelet podem ser empregadas no processo de diagnóstico de faltas em LT [1-5].

A transformada wavelet é uma ferramenta matemática que decompõe um sinal em diferentes componentes de frequência. Sua modalidade de maior utilidade é a transformada wavelet discreta (TWD) por ser aplicável a sinais discretos no tempo [6-8].

A TWD utiliza um esquema denominado de *lifting*, no qual um sinal amostrado no tempo é transformado para o domínio wavelet através de técnicas de filtragem digital [4]. De fato, a TWD pode ser interpretada como um banco de filtros, visto que em cada escala de resolução, o sinal passa por dois filtros: um passa alta (FPA) e outro passa baixa (FPB) (Figura 2). As saídas dos FPA e FPB correspondem, respectivamente, aos coeficientes wavelet e à versão suavizada do sinal original.

A partir da análise de registros de faltas reais em LT no domínio wavelet, constatou-se que, de modo geral, as correntes representam melhor as características desse tipo de evento.

As características dos sinais de tensão e corrente que são relevantes para o diagnóstico são aquelas referentes apenas ao intervalo de falta. Neste sentido, a identificação da duração da falta deve ser a mais exata possível [1].

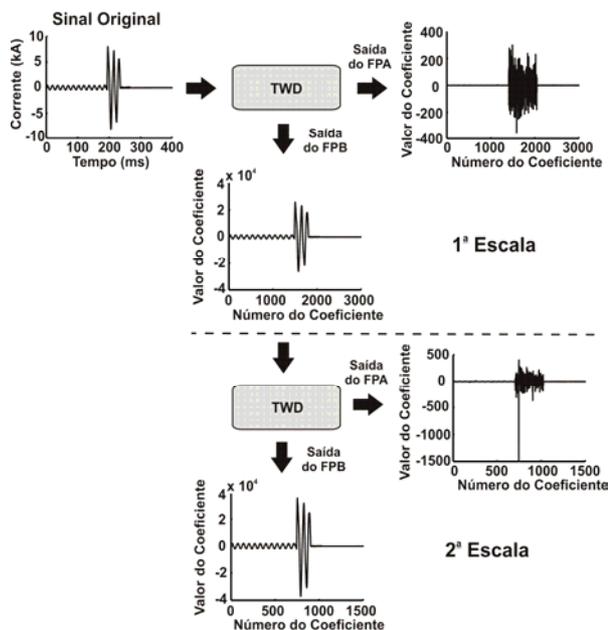


Figura 2 – Transformada wavelet discreta.

Em [1], um método de identificação dos instantes de início e fim de faltas em LT baseado na TWD foi proposto. Apenas os coeficientes wavelet das correntes, referentes à primeira escala de resolução são utilizados. Mesmo assim, o método apresentou bom desempenho na determinação do início da falta. Embora não tenha apresentado a mesma eficácia para o instante final da falta. Em muitos casos houve discrepâncias consideráveis.

Neste artigo são propostas modificações para tornar o método original [1] mais robusto e mais preciso. O método modificado foi concebido a partir da análise do comportamento dos coeficientes wavelet das correntes, considerando-se diferentes escalas de resolução. Seu desempenho foi avaliado para diversos registros de faltas em diferentes LT do sistema da Chesf, reportando bons resultados para todos os registros avaliados.

Os métodos (original e proposto) de que trata este artigo é resultado de um projeto de P&D da Chesf, desenvolvido pelo Grupo de Sistemas Elétricos da Universidade Federal de Campina Grande.

## 2.0 MÉTODO PROPOSTO

Um diagrama esquemático do método proposto é apresentado na Figura 3.

Os dados de entrada são os campos do registro oscilográfico, referentes às correntes em grandeza de fase e de sequência zero.

Inicialmente, aplica-se a TWD a cada uma das correntes de fase e de sequência zero. Em seguida, emprega-se uma técnica de filtragem denominada de *hard wavelet threshold* (HWT) na saída de cada FPA da 1ª escala. Aplicam-se então, dois conjuntos de regras:

- O primeiro conjunto determina o instante inicial da falta ( $t_i$ ) e estima uma *primeira indicação* do instante final da falta ( $t_f'$ ).
- O segundo conjunto seleciona uma das fases envolvidas na falta e a participação ou não da terra.

Se a terra estiver envolvida na falta, é necessário analisar os coeficientes wavelet da 4ª escala referente à fase selecionada e à componente de sequência zero. Caso contrário, apenas os coeficientes wavelet da 4ª escala referente à fase selecionada são analisados. Com essa análise, obtém-se uma *segunda indicação* do instante final da falta ( $t_f''$ ). O instante final da falta ( $t_f$ ) é escolhido como o *menor valor* entre  $t_f'$  e  $t_f''$ .

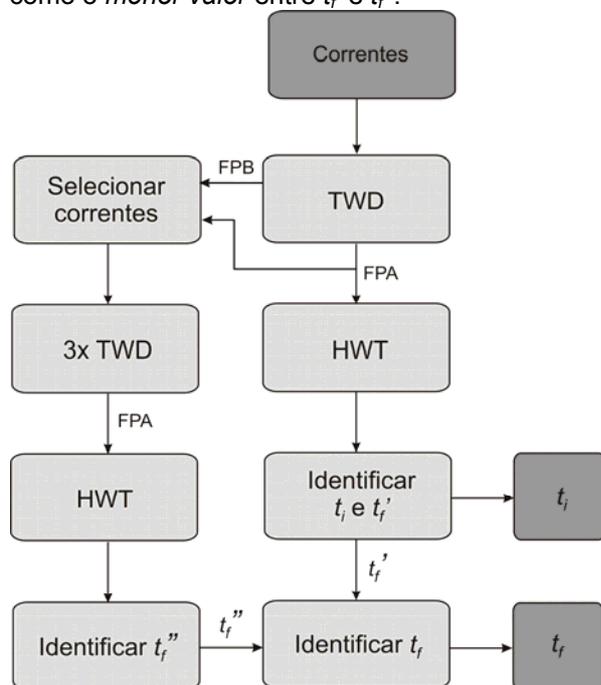


Figura 3 – Fluxograma do método proposto.

## 2.1 Filtragem dos coeficientes wavelet

A técnica HWT é empregada para filtrar os coeficientes wavelet das correntes relacionados a ruído de natureza elétrica [9]. Neste trabalho, a técnica HWT é aplicada à saída dos FPA da 1ª e 4ª escalas.

A equação fundamental da técnica HWT é:

$$\hat{d}_j(k) = \begin{cases} d_j(k), & \text{se } |d_j(k)| \geq \lambda \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (1)$$

Sendo:

$k$  o número de amostras do sinal;

$J$  o nível de resolução (escala);

$d$  o coeficiente wavelet;

$\hat{d}$  o coeficiente wavelet filtrado;

$\lambda$  o limiar de *threshold*.

Para ilustrar o uso dessa técnica utiliza-se um sinal de corrente de fase com falta (Figura 4). Nas Figuras 5 e 6 apresentam-se os coeficientes wavelet da 1ª e 4ª escalas de resolução (antes e após filtragem), respectivamente, do sinal.

O valor de limiar  $\lambda$  empregado na filtragem foi de 15% do maior coeficiente wavelet (em valor absoluto).

## 2.2 Determinação do instante inicial

Na fase de transição entre as etapas de pré-falta e falta ocorre uma grande incidência de componentes de alta frequência, os quais possuem coeficientes wavelet de maior valor. Esses coeficientes têm importância crucial para a determinação do instante inicial da falta.

O instante inicial da falta é detectado por meio de regras construídas a partir da análise dos coeficientes wavelet da 1ª escala de resolução.

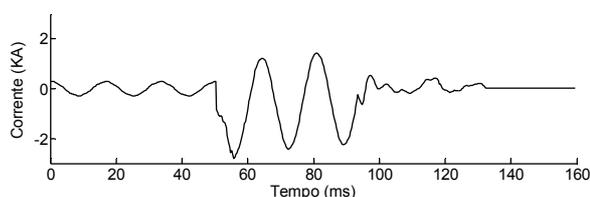
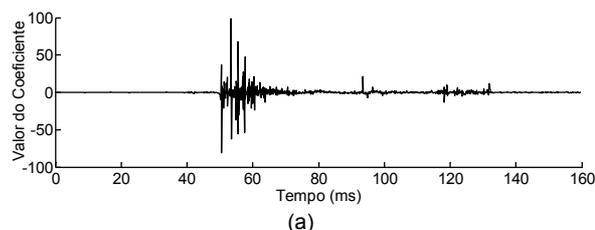


Figura 4 – Corrente em uma fase com falta.



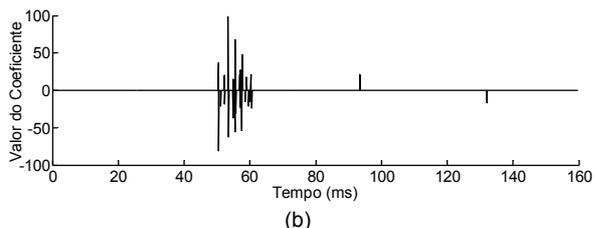


Figura 5 – Análise wavelet da 1ª escala. a) Coeficientes wavelet. b) Coeficientes wavelet após *threshold*.

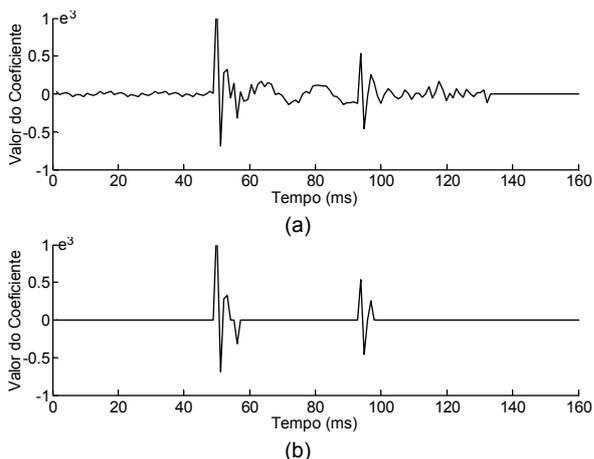


Figura 6 – Análise wavelet da 4ª escala. a) Coeficientes wavelet. b) Coeficientes wavelet após *threshold*.

O procedimento adotado para determinar o instante inicial da falta segue os passos abaixo:

1. Aplica-se a TWD aos sinais de corrente de fase e de sequência zero.
2. Aplica-se HWT à saída dos FPA, considerando-se apenas a 1ª escala.
3. Identifica-se o índice do primeiro coeficiente wavelet diferente de zero para cada uma das correntes de fase e de sequência zero.
4. Define-se o índice do coeficiente inicial da falta como sendo aquele relacionado ao *maior* índice, dentre os determinados no passo 3.
5. Calcula-se a amostra referente ao início da falta como sendo o dobro do índice do coeficiente inicial determinado no passo 4.

### 2.3 Detecção de uma fase envolvida

A análise na 4ª escala, mostra que os coeficientes das correntes durante a falta são determinantes na detecção do instante final da falta. Portanto, é de fundamental importância identificar pelo menos, uma das fases em que a falta ocorreu. Essa identificação é feita avaliando-se a amplitude dos coeficientes wavelet da 1ª escala. A fase escolhida é aquela que apresentar o coeficiente wavelet de maior valor absoluto.

### 2.4 Verificação da participação da terra

A participação da terra na falta é avaliada pelos coeficientes wavelet da 1ª escala referente à componente de sequência zero da corrente. Se o valor absoluto do maior coeficiente wavelet for maior que 80% do maior coeficiente wavelet das correntes de fase, então é subtendida a falta para a terra. Neste caso, mesmo que a falta não envolva a terra, os coeficientes dessa corrente indicarão com boa precisão o instante final da falta.

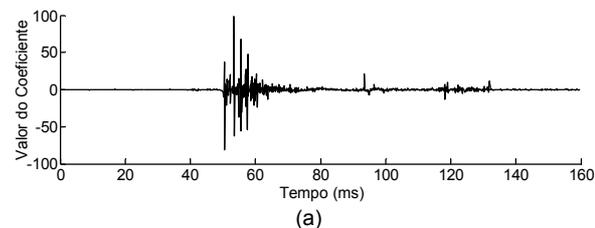
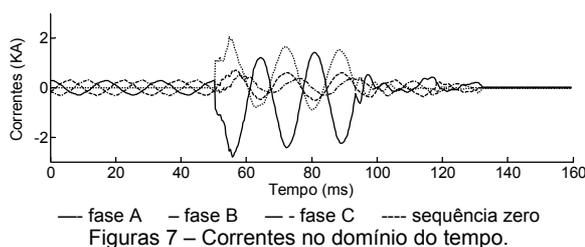
Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os sinais de corrente no domínio do tempo e wavelet, respectivamente, referentes a uma falta monofásica da fase A para a terra.

### 2.5 Determinação do instante final

O instante final da falta,  $t_f$ , é identificado a partir de regras construídas analisando-se os coeficientes wavelet das 1ª e 4ª escalas.

A primeira estimativa,  $t_f'$ , é feita avaliando-se os coeficientes wavelet da 1ª escala conforme os seguintes passos:

1. Identifica-se o índice do último coeficiente diferente de zero para cada uma das correntes de fase e de sequência zero.
2. Define-se o índice do coeficiente final da falta como sendo aquele relacionado ao maior índice, dentre aqueles determinados no passo anterior.
3. Calcula-se a amostra final da falta referente à  $t_f'$  como sendo o dobro do índice do coeficiente final determinado no passo 2.



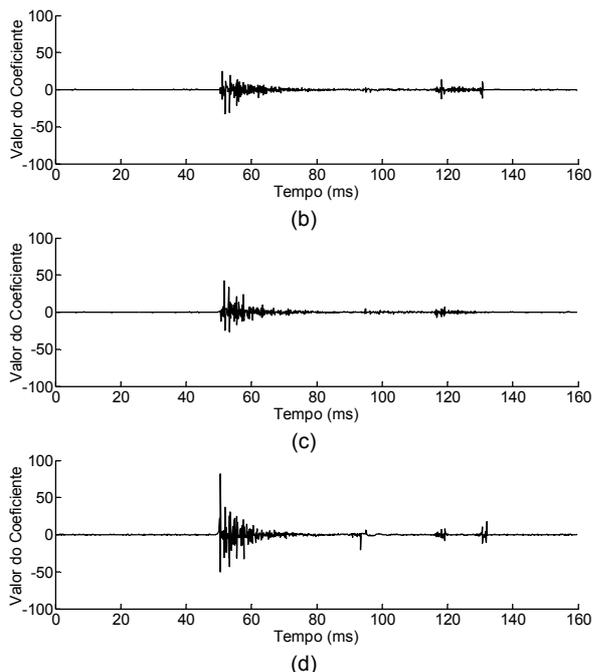


Figura 8 – Coeficientes wavelet da primeira escala para: a)  $I_a$ ; b)  $I_b$ ; c)  $I_c$ ; d)  $I_0$ .

A segunda estimativa,  $t_f''$ , é feita avaliando-se os coeficientes wavelet da 4ª escala conforme os seguintes passos:

1. Identifica-se o índice do último coeficiente diferente de zero para a corrente na fase selecionada e de sequência zero, se for o caso.
2. Define-se o índice do coeficiente final da falta como sendo aquele relacionado ao menor dentre os determinados no passo 1.
3. Calcula-se a amostra final da falta referente à  $t_f''$  como sendo 16 vezes o índice do coeficiente final.

O instante final da falta,  $t_f$ , é definido como sendo o menor instante entre  $t_f'$  e  $t_f''$ .

#### 4.0 RESULTADOS

Na avaliação do método proposto foram considerados vários registros oscilográficos para diversas LT do sistema Chesf.

Os sinais de corrente e tensão empregados possuem um ciclo na frequência fundamental de aproximadamente 16,67ms. A duração da falta depende do tempo de atuação da proteção que pode variar de 3 a 8 ciclos.

Uma forma de validar o algoritmo de detecção do instante de falta é através da avaliação do erro obtido, ao comparar os instantes inicial e final com aqueles indicados por um especialista. Na

Tabela 1 são apresentados os erros obtidos para  $t_i$  e  $t_f$  (em ms), para o algoritmo modificado (AM) proposto aqui e para o algoritmo original (AO) proposto em [1].

Tabela 1 – Resultados obtidos

Falta	Nível de tensão (kV)	Erro (ms)			
		Início		Fim	
		AM	AO	AM	AO
AT	230	1,23	2,10	0,50	0,60
AT	230	1,27	1,27	0,53	0,53
AT	230	1,20	1,20	0,10	0,10
AT	230	0,02	0,02	0,50	0,11
BT	230	0,17	0,17	0,37	16,42
BT	230	0,30	0,30	0,77	0,77
BT	230	1,41	1,41	0,30	1,97
BT	230	1,17	11,34	0,25	20,45
BT	500	0,04	0,03	1,86	0,04
BT	230	1,10	1,10	0,63	6,03
CT	230	0,11	0,11	0,43	1,40
CT	230	0,20	0,20	0,70	0,70
CT	230	0,25	0,25	0,11	35,57
CT	230	0,06	0,06	0,94	16,63
CT	230	0,30	0,30	0,60	0,60
CT	230	0,17	0,17	0,43	0,09
AB	500	1,30	1,32	0,33	0,90
AB	230	0,12	10,93	0,54	18,73
ABT	230	1,30	1,30	0,33	2,00

O processo utilizado para definir  $t_i$  é análogo em ambos os algoritmos AO e AM. Por isso, na maioria dos registros analisados, seus instantes iniciais são idênticos. No entanto, o AM utiliza um limiar  $\lambda$  com um valor mais adequado, proporcionando uma melhora significativa nos casos em que AO não obteve bons resultados.

A utilização da quarta escala para determinar o instante final da falta possibilitou erro médio de aproximadamente 0,50ms, que é um valor razoavelmente pequeno se comparado ao intervalo de falta nos registros analisados. Em [1] foi utilizado todas as correntes para determinar o  $t_f$ , considerando apenas a primeira escala, resultando em alguns casos erros elevados.

Na Figura 9 é apresentado o intervalo de falta obtido com os algoritmos AM e AO para as correntes mostradas na Figura 7. O  $t_f$  obtido com AM é mais preciso que o obtido com AO.

Observa-se que a saída filtrada do FPA na primeira escala fornece informações referentes ao instante em que as correntes se anularam (algoritmo AO). Já a saída filtrada do FPA na quarta escala, para as correntes adequadas, fornece informações referentes ao instante em que a proteção atuou (algoritmo AM).

Para o registro oscilográfico apresentado na Figura 10, o intervalo de falta é análogo para os

dois algoritmos. A incidência de transitórios após o instante final da falta depende das condições nas quais a falta foi extinta. Neste exemplo, o final da falta ocorreu quando as correntes envolvidas possuíam baixa amplitude, o que reduziu a ocorrência dos transitórios. Como o instante em que as correntes se anularam é aproximadamente igual ao instante em que a falta foi extinta, o AO obteve um bom desempenho. Já AM apresentou bons resultados independentemente desse fato.

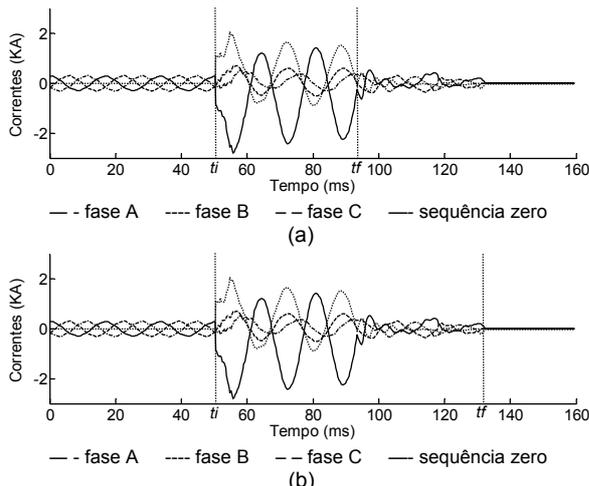


Figura 9 – Instantes inicial e final da falta determinados pelos algoritmos: a) AM. b) AO.

Em algumas situações, uma falta pode passar de um tipo para outro, a depender das condições nas quais o distúrbio tenha ocorrido. Esse tipo de situação é denominado de falta evolutiva (Figura11).

Da forma como foi implementado, o método proposto detecta o instante inicial referente à primeira falta e o instante final referente à última falta. Em trabalhos futuros, pretende-se avaliar este tipo de distúrbio para adicionar regras e tornar o algoritmo capaz de detectar os instantes de transição entre as faltas.

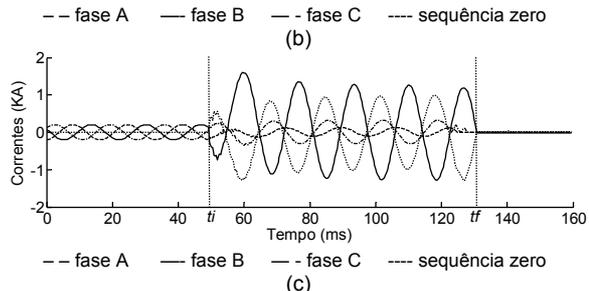
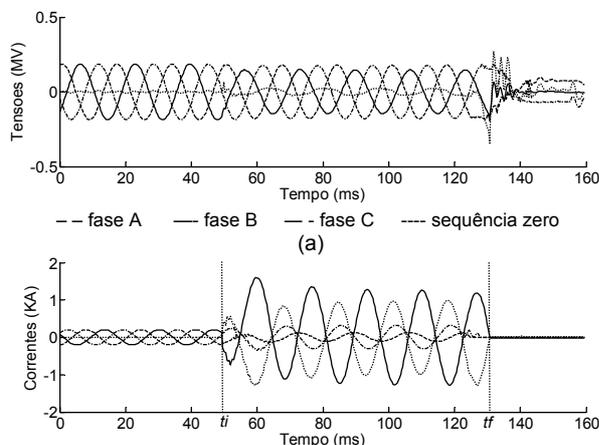


Figura 10 – Sinais no domínio do tempo. a) Tensões. b) Correntes e intervalo de falta determinado por AM. c) Correntes e intervalo de falta determinado por AO.

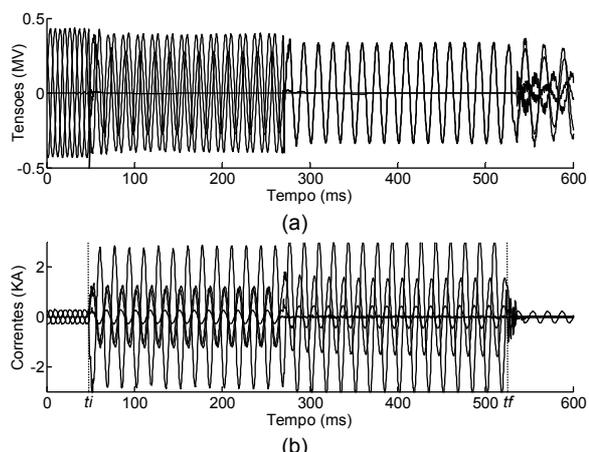


Figura 11 – Falta evolutiva. a) Tensões. b) Correntes.

### 5.0 CONCLUSÕES

Um método para delimitação do instante de falta em LT foi desenvolvido e avaliado para as diversas linhas do sistema Chesf e resultados satisfatórios foram obtidos.

Os bons resultados apresentados pelo método proposto são devidos à característica das wavelet em prover informações sobre os sinais analisados, no domínio do tempo e da frequência. Essa técnica vem se mostrando bastante adequada para a análise dos sinais transitórios oriundos de faltas em LT.

O método proposto encontra-se implementado em um software de análise automática de registros oscilográficos, que está integrado em escala piloto a um sistema de monitoramento de uma LT de 230kV do sistema Chesf, entre as subestações de Campina Grande II e Natal II. Outras regras já estão sendo incorporadas ao algoritmo para realizar também a delimitação da duração de distúrbios de qualidade de energia, a exemplo de afundamentos de tensão.

### 6.0 BIBLIOGRAFIA

[1] SILVA, K. M. *Diagnóstico de faltas em linhas de transmissão baseado em redes neurais artificiais e transformada wavelet*. Dissertação de Mestrado,

- Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.
- [2] BRITO, N. S. D. *Teoria wavelet e sua aplicação em sistemas de energia elétrica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.
- [3] BRITO, N. S. D. *Teoria das wavelets - estudo e aplicação na análise de transitórios em sistemas de potência*. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.
- [4] RAMOS, K. S. S. *Caracterização de distúrbios em redes de energia elétrica através da transformada wavelet de segunda geração*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.
- [5] LIRA, M. M. S. *Wavelets na compactação e processamento de sinais de distúrbios em sistemas de potência classificados via redes neurais artificiais*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.
- [6] DAUBECHIES, I. *The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis*. IEEE Trans. on Information Theory, v. 36, n. 5, September 1990.
- [7] DAUBECHIES, I. *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia: CBMS-NSF Regional Conf. Series, SIAM, 1992.
- [8] BURRUS, C. S.; RAMESH, A. G. & GUO, H. *Introduction to wavelets and wavelet transforms*. Prentice Hall, 1998.
- [9] SANTOSO, S.; POWERS, E. J. & GRADY, W. M. *Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods*. IEEE Trans. on Power Delivery, v. 12, n. 3, July 1997.
- [10]

