



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica
Grupo de Sistemas Elétricos



Detecção do Intervalo de Falta em Linhas de Transmissão via Wavelets

Aluno: Flávio Bezerra Costa
Orientadora: Núbia Silva Dantas Brito

Campina Grande, 18 de fevereiro de 2005



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Índice

Agradecimentos.....	3
1. Apresentação.....	4
2. Motivação.....	5
3. O Módulo Wavelet.....	8
4. Análises e Implementações Efetuadas.....	13
4.1 Análise dos Registros.....	15
a) Registro1: 2003_07_09_14_02_51, falta AT.....	17
b) Registro2: 2003_07_27_17_58_20, falta CT.....	20
c) Registro3: 2004_02_27_10_23_13, falta CT.....	23
d) Registro4: 2004_02_27_11_02_06, falta CT.....	26
f) Registro6: 2004_02_09_10_55_21, falta CT.....	32
g) Registro7: 2004_03_29_06_11_12, falta BT.....	35
h) Registro8: 2004_03_16_22_49_36, falta BT.....	38
i) Registro9: 2004_08_16_01_09_05, falta AB.....	41
j) Registro10: 2003_11_25_15_11_44, falta ACT.....	44
l) Registro11: 2004_07_22_16_47_28, falta BT.....	47
m) Registro12: 2004_07_02_11_02_02, falta BT.....	50
n) Registro13: 2004_04_26_16_30_41, falta ABT.....	53
o) Registro14: 2003_08_30_09_25_25, Falta AB.....	56
5. Conclusões.....	77
6. Referências Bibliográficas.....	78

Agradecimentos

A Deus, por sempre estar ao meu lado em todas as fases de minha vida. A minha família, em especial Maria Lúcia Bezerra, Genilda Lúcia Bezerra, Geraldo Duarte Bezerra e Francisco Alves da Costa, pelo enorme esforço feito para que eu tivesse a oportunidade de chegar até aqui, pela educação oferecida e pelo incentivo nas horas difíceis.

Aos professores e funcionários do Grupo de Sistemas Elétricos pelo agradável convívio, respeito, amizade, reconhecimento e incentivo.

Aos professores Núbia Silva Dantas Brito e Benemar Alencar de Souza, pela grande contribuição para o desenvolvimento deste trabalho e pela participação valiosa em minha formação acadêmica e profissional.

Aos amigos e colegas: Alessandro V. Fontes, Erivaldo dos Santos Simões, Kleber Melo e Silva, Karcius M. C. Dantas, José Antônio C. B. da Siva, Max G. G. Néri, Tarso V. Ferreira, George R. S. de Lira, Ricardo B. de Vasconcelos Lima e Antônio Carlos M. de Melo Silva.

Ao CNPq, a Chesf e ao GSE pelo suporte financeiro concedido durante o curso.

E por último, a Lucilene Laudelino de Goes, pela paciência e dedicação e por suportar minha ausência.

1. Apresentação

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo desenvolver um algoritmo, baseado na transformada wavelet discreta, capaz de determinar o intervalo de falta em sinais provenientes dos registradores de perturbação digitais (RDP), fornecidos pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF). O algoritmo desenvolvido será incorporado ao software Neuranálise® [1], o qual foi desenvolvido pelo Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco, mediante um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).

Este TCC se restringe ao estudo de faltas não evolutivas.

2. Motivação

O Neuranálise[®] é um software identificador e classificador de faltas em linhas de transmissão de energia elétrica baseado em redes neurais artificiais (RNA) e na transformada wavelet discreta (TWD). Ele efetua, de forma automática, a triagem e pré-análise dos registros oscilográficos provenientes dos RDP da rede oscilográfica da CHESF. Na forma como foi concebido, o software foi incorporado ao sistema de oscilografia, integrando-se à rede de aquisição de dados já instalada. O Neuranálise[®] é constituído por três módulos:

- Neurabase: módulo de geração da Base de Dados a ser utilizada no treinamento da rede neural. Possui uma interface gráfica e utiliza o software ATP para modelagem do sistema elétrico e simulação dos diversos cenários de falta.
- Neurarede: módulo de construção e treinamento da rede neural. Possui uma interface gráfica e utiliza a Base de Dados construída pelo Neurabase.
- Neurareg: módulo de análise e triagem de registros. Esse módulo utiliza a TWD e uma RNA previamente treinada com o Neurarede.

A estrutura do módulo Neurareg é apresentada na Figura 1, sendo composto de quatro módulos:

Módulo de pré-análise: responsável pela avaliação preliminar do registro. Tem como principal objetivo detectar faltas no sistema que está sendo monitorado. Caso nenhuma falta seja detectada, esse módulo indica se o registro contém ou não, algum evento anormal (afundamento de tensão, desligamento não programado, etc). Caso uma falta seja detectada, esse módulo confina o intervalo de amostras do registro no qual a falta esta contida.

Módulo de normalização: Normaliza o intervalo de análise para os máximos valores de tensão e corrente.

Módulo de re-amostragem: detectada uma falta, o módulo de re-amostragem é acionado visando *re-amostrar* os sinais de tensão e corrente do intervalo delimitado, para a frequência adotada de 1.200 Hz [2].

Módulo de classificação: após a etapa de re-amostragem, os sinais são então, enviados para o módulo de classificação. Um esquema de janelamento é efetuado nos sinais, os quais são então, apresentados a RNA. Ao final, é feito um diagnóstico do evento avaliando (tipo de falta, duração do evento, data, hora, etc.).

Apesar do bom desempenho obtido, o Neuranálise® necessita de melhorias que resultem em diagnósticos mais seguros. Além disso, é desejo da empresa, a implantação do Neuranálise® em outras partes do seu sistema. Nesse caso, é necessário avaliar o poder de generalização do software. Como o projeto de P&D que produziu o sistema Neuranálise® se restringiu à concepção, desenvolvimento e aplicação em escala piloto, o planejamento do módulo de pré-análise também foi feito com base nas características desse sistema piloto, inclusive as regras de *threshold* e de avaliação dos coeficientes wavelet.

Apesar do módulo de pré-análise estar se mostrando robusto, é necessário se reavaliar todas as suas etapas para que se tenha maior segurança quando o Neuranálise® passar a monitorar outros pontos do sistema. Diante do exposto, conclui-se que é de importância fundamental para o Neuranálise® investir-se no melhoramento do módulo de pré-análise. Este TCC apresenta o estudo realizado para obtenção de melhorias nesse módulo, em particular, no módulo wavelet.

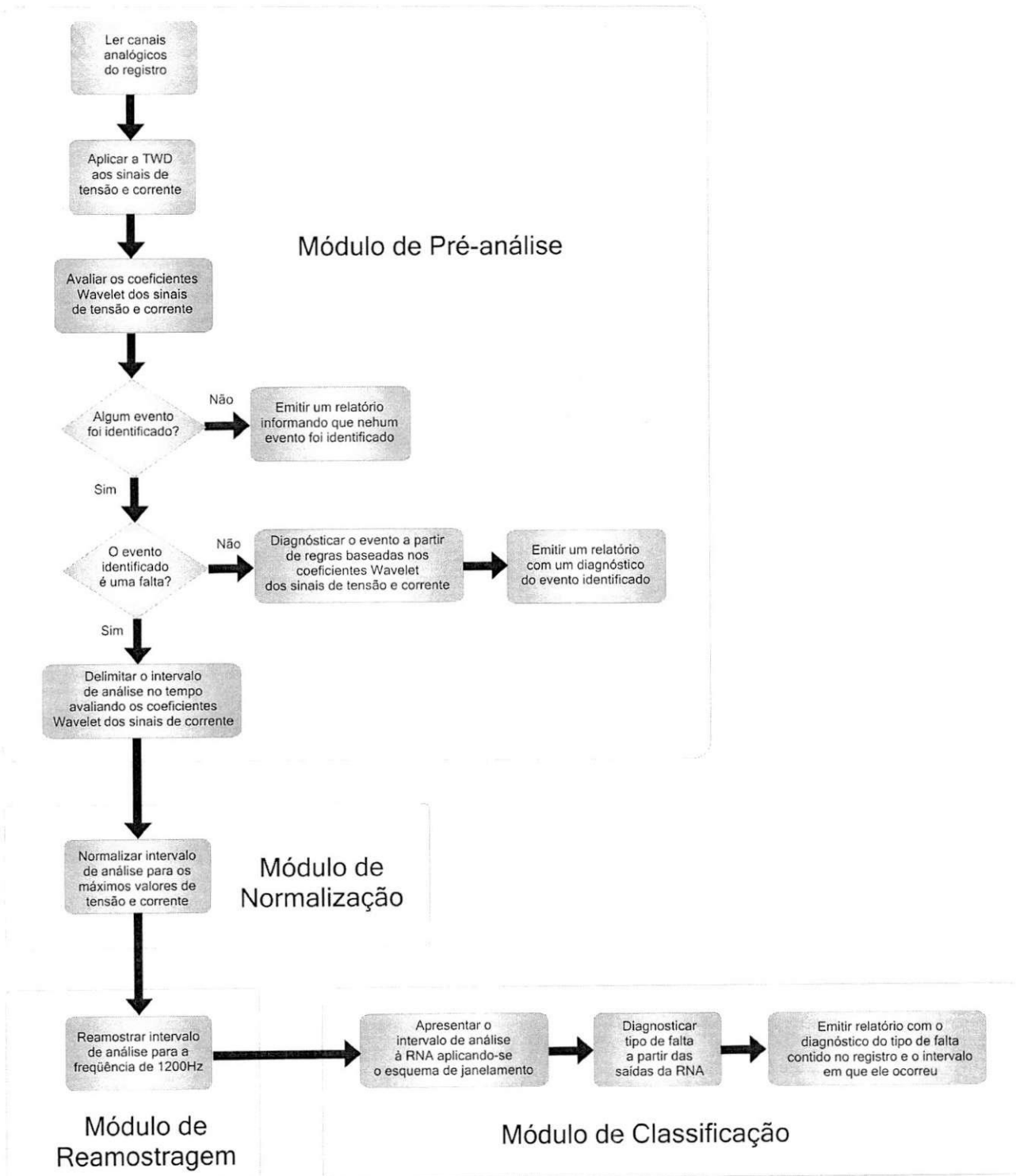


Figura 1 - Fluxograma de funcionamento do Neurereg.

3. O Módulo Wavelet

A detecção do intervalo de falta é realizada de acordo com a Figura 2. Os sinais provenientes dos RDP (registros oscilográficos) são apresentados ao módulo wavelet, o qual deve delimitar o intervalo de ocorrência da falta.

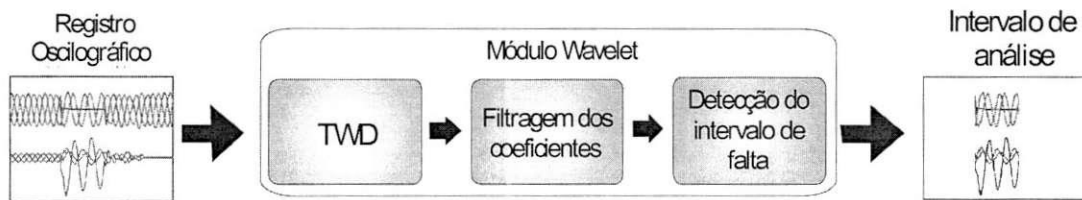


Figura 2 - Módulo wavelet.

Na grande maioria das vezes, um registro oscilográfico é constituído de três etapas distintas: pré-falta, falta e pós-falta (Figura 3).

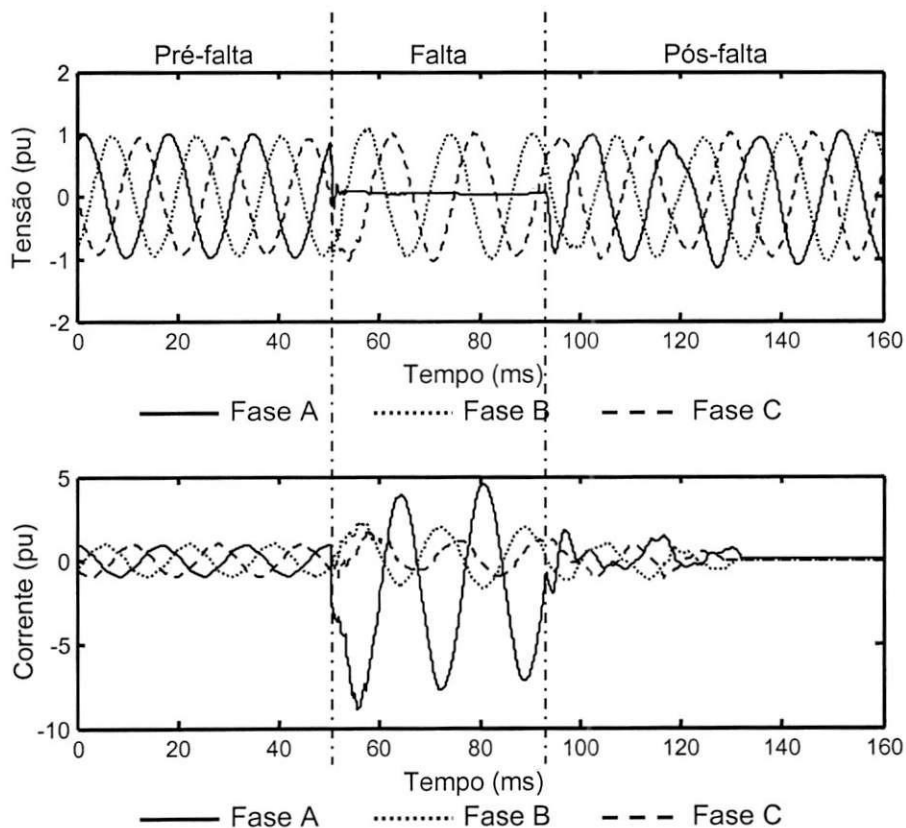


Figura 3 - Registro real com a indicação das etapas de pré-falta, falta e pós-falta.

Em geral, a identificação e determinação do intervalo de duração de cada uma dessas etapas não é uma tarefa fácil. A etapa de pré-falta consiste nas

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

Na forma como foi implementada, a identificação do trecho com falta foi feita a partir da análise dos coeficientes wavelet da primeira escala, das amostras dos sinais de tensão e corrente fornecidos pelo RDP. Constatou-se que o desempenho do Neurareg melhora, à medida que se obtém maior precisão na determinação desse intervalo. Na prática, entretanto, a presença de ruído de natureza elétrica pode interferir na etapa da identificação exata da duração da falta. Esse efeito pode ser reduzido através de um processo de filtragem. Dentre as diversas formas de filtragem disponíveis, o Neurareg usa a técnica denominada *hard wavelet threshold* (HWT). Essa técnica atua de forma a preservar apenas os coeficientes wavelet com valores acima de um determinado limiar [3].

Na Figura 4 apresenta-se o fluxograma do processo implementado para identificação da duração do evento, cujo algoritmo implementado atualmente no Neuranálise® é apresentado logo a seguir.

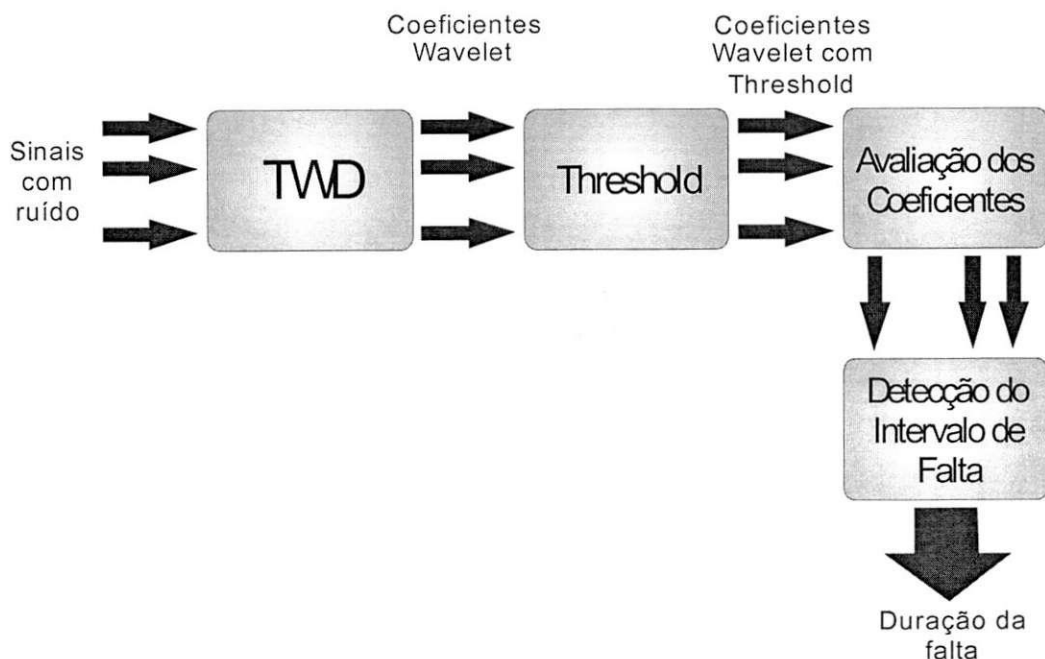


Figura 4 - Delimitação do intervalo de falta.

Algoritmo I

1. Selecionar como sinais de entrada: Ia, Ib, Ic.
2. Aplicar a TWD aos sinais no domínio do tempo, considerando-se apenas os coeficientes wavelets de primeira escala. Normalmente, esses coeficientes indicam a presença dos transitórios de alta frequência dos sinais.
3. Aplicar a técnica HWT aos coeficientes wavelet de detalhes de todos os sinais avaliados. Normalmente, permanecem apenas os coeficientes wavelet relacionados aos distúrbios.
4. Avaliar os coeficientes wavelet de cada sinal para escolha dos instantes inicial e final. Para cada sinal, o primeiro coeficiente não nulo refere-se ao instante inicial e o último coeficiente não nulo refere-se ao instante final.
5. Selecionar os instantes inicial e final do *registro*. A forma implementada no Neuranálise® consiste em escolher dentre os instantes selecionados na etapa 4, o menor instante inicial e o maior instante final.

De um modo geral, a técnica HWT consiste na aplicação dos seguintes passos:

1. Definição do valor de limiar de *threshold* (λ_j).
2. Aplicação da TWD ao sinal.
3. Selecionar o número de níveis de decomposição do sinal.
4. Eliminar os coeficientes wavelet que estiverem (em módulo) abaixo do valor de limiar, através da seguinte equação:

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

k : número da amostra do sinal

j : nível de resolução (escala)

Sendo: d : coeficiente wavelet de detalhes

\hat{d} : coeficiente wavelet de detalhes pós - threshold

Esse procedimento é feito para os coeficientes de cada nível de resolução.

5. Dependendo da aplicação, aplica-se ao final a transformada wavelet inversa (TWI) para retornar ao domínio do tempo. O sinal agora é uma versão modificada do sinal original, normalmente, sem a presença de ruído elétrico.

Existem diversas maneiras de se determinar o valor de λ_j . Apresentam-se a seguir algumas dessas formas.

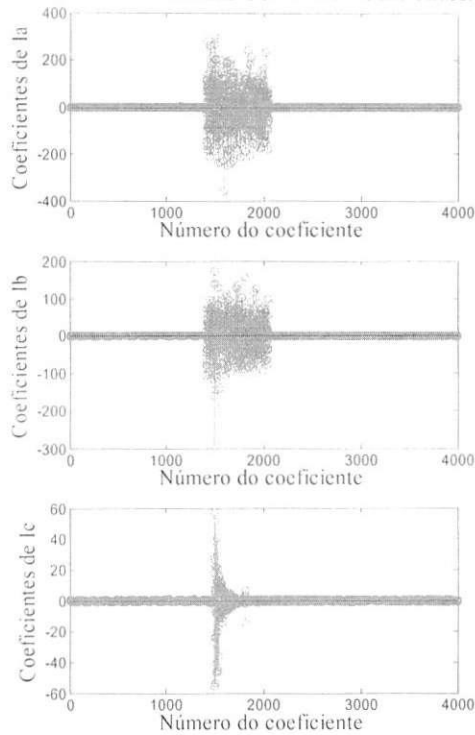
$$\text{➤ } \lambda_j = \eta \cdot \max |d_j(k)| \quad [4] \quad (2)$$

$$\text{➤ } \lambda_j = \frac{1}{0,6745} \text{med} |d_j(k)| \cdot \sqrt{2 \cdot \ln(j)} \quad [5] \quad (3)$$

$$\text{➤ } \lambda_j = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_1^K (d_j(k))^2} \quad [6]. \quad (4)$$

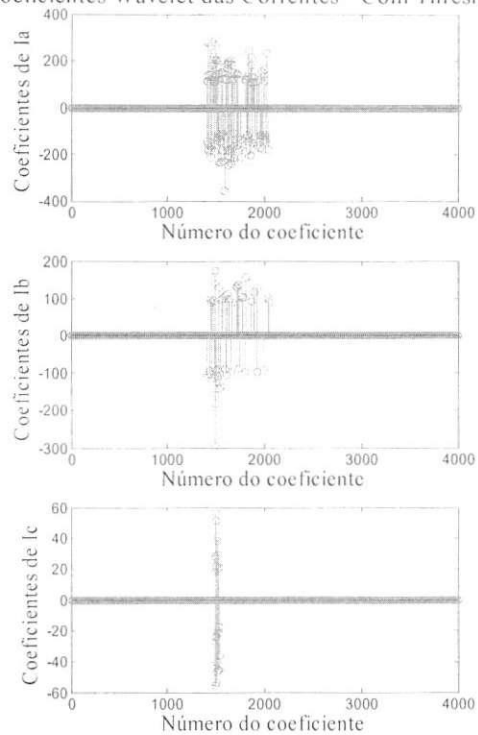
O Neuranálise[®] utilizou a equação (2) para definir o valor de λ_j . Na Figura 5 é apresentado um exemplo da aplicação dessa técnica.

Coefficientes Wavelet das Correntes - Sem Threshold



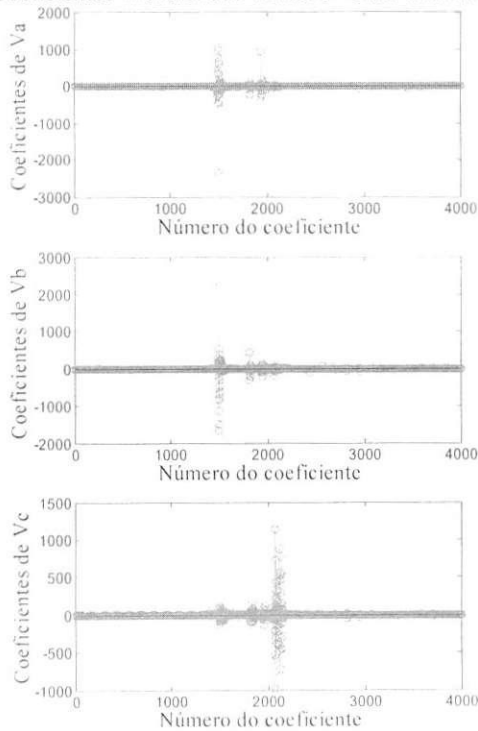
(a)

Coefficientes Wavelet das Correntes - Com Threshold



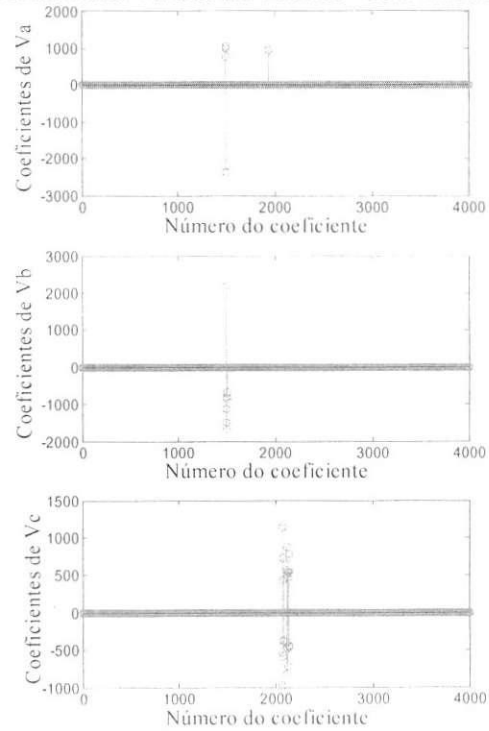
(b)

Coefficientes Wavelet das Tensões - Sem Threshold



(c)

Coefficientes Wavelet das Tensões - Com Threshold




(d)


Figura 5 - Coeficientes wavelet (falta AB): (a) Correntes sem *threshol*d. (b) Correntes com *threshol*d. (c) Tensões sem *threshol*d. (d) Tensões com *threshol*d.

4. Análises e Implementações Efetuadas

Visando facilitar os estudos a serem realizados, desenvolveu-se uma interface amigável para auxiliar a análise dos sinais nos domínios do tempo e wavelet (Figura 6). Constatou-se que essa interface facilitou de forma decisiva o estudo comparativo dos diversos sinais em ambos os domínios. A interface, além de apresentar os sinais no domínio do tempo e no domínio wavelet, também informa os instantes de início e término da falta.

Os comandos elementares da interface se encontram no menu e na barra de ferramentas da janela principal (Figura 6). Na barra de ferramentas estão disponíveis os comandos mais utilizados, como o comando *abrir*, *salvar*, entre outros.

 Comando *abrir*: abre um arquivo .cfg. Uma janela similar aquela da Figura 7 é apresentada.

 Comando *salvar*: salva os gráficos. Este comando funciona como o *salvar como* quando acionado pela primeira vez.

Comando *ajuda*: apresenta um arquivo com informações sobre a utilização do software e do projeto em geral.

O menu *Arquivo* oferece alguns outros comandos básicos como: *fechar*, *salvar como* e *sair*.

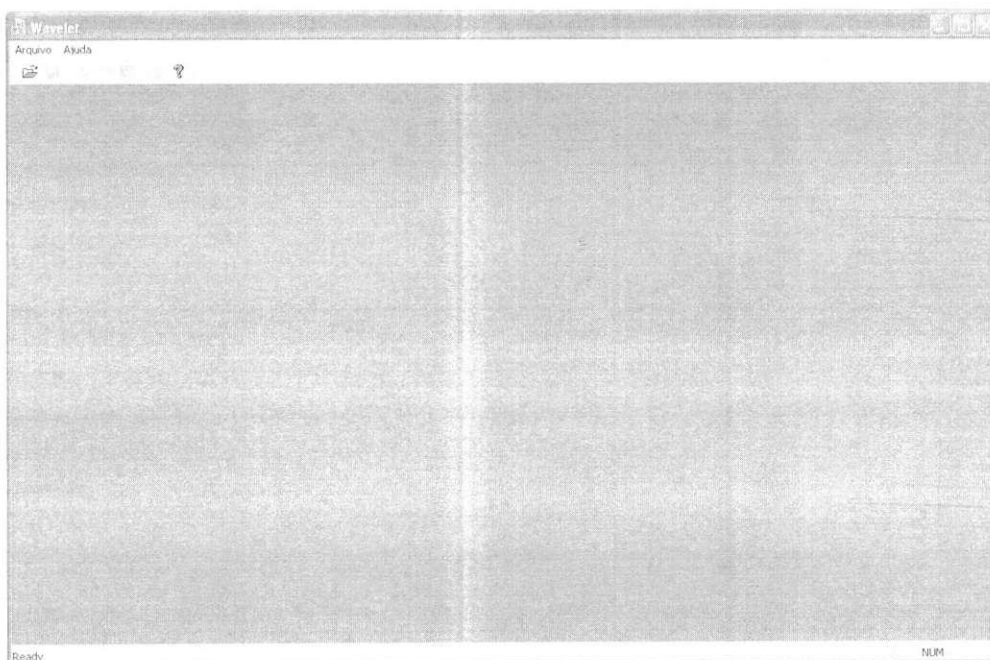


Figura 6 - Interface inicial.

Os gráficos são analisados em uma janela semelhante à apresentada na Figura 7. Os sinais referentes às fases A, B, C e de seqüência zero são apresentados com as cores azul, vermelha, roxa e verde, respectivamente.

Os sinais são mostrados em duas regiões:

Região 1 (a esquerda): gráficos dos sinais de tensão e corrente no domínio do tempo. São mostradas duas retas verticais demarcando o intervalo referente à duração da falta.

Região 2 (a direita): gráficos dos coeficientes wavelet de tensão e de corrente, em diversas escalas.

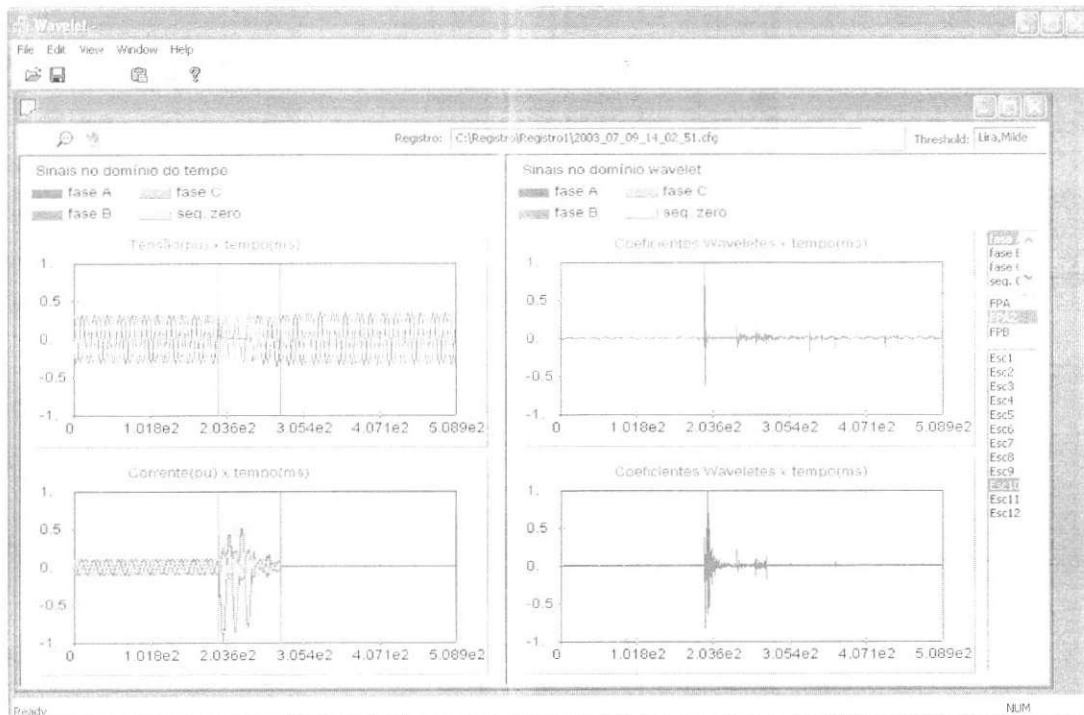




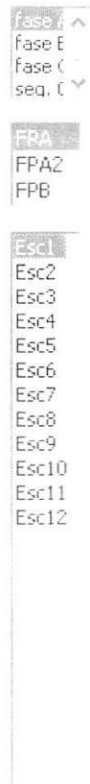
Figura 7 - Janela gráfica.

A barra de ferramentas fornece algumas informações importantes como, por exemplo, o nome do registro, o tipo de *threshold* e ainda:

-  Desfaz a ampliação de determinado gráfico.
-  Mostra interface apresentada na Figura 8.

Um gráfico pode ser ampliado ao ser selecionado fazendo um *click* duplo no mouse e em seguida, pressionado o botão direito do mouse na posição inicial e final da região que se pretende ampliar.

Observa-se que à direita é fornecido um *listbox* com a função para selecionar o tipo de sinal a ser apresentado.



Seleciona a fase, na qual os coeficientes wavelet de tensão e corrente serão apresentados.

- Se FPA (filtro passa alta) for selecionado, então os coeficientes wavelet de detalhes de determinado sinal serão apresentados;
- Se FPA2 (filtro passa alta ao quadrado) for selecionado, então os coeficientes wavelet de detalhes ao quadrado serão apresentados;
- Se FPB (filtro passa baixa) for selecionado, então os coeficientes wavelet de aproximação serão apresentados.

Seleciona a escala wavelet do sinal.

4.1 Análise dos Registros

Constatou-se que os sinais de entrada que melhor caracterizam o intervalo de falta são: Ia, Ib, Ic, I0 e V0. Apresenta-se a seguir o estudo realizado sobre a influência desses sinais, utilizando o algoritmo 1, no processo de detecção do intervalo de falta. Utilizou-se a wavelet DAUB4 e *hard limit wavelet threshold* com limiar de 0,15.

Na figura 8 é apresentada uma interface gráfica, em que é possível escolher um determinado sinal e verificar a influencia deste sinal na detecção do intervalo de falta. Pode-se ainda, verificar o intervalo de falta de acordo com os algoritmos desenvolvidos neste TCC. Apenas uma das opções pode ser escolhida.

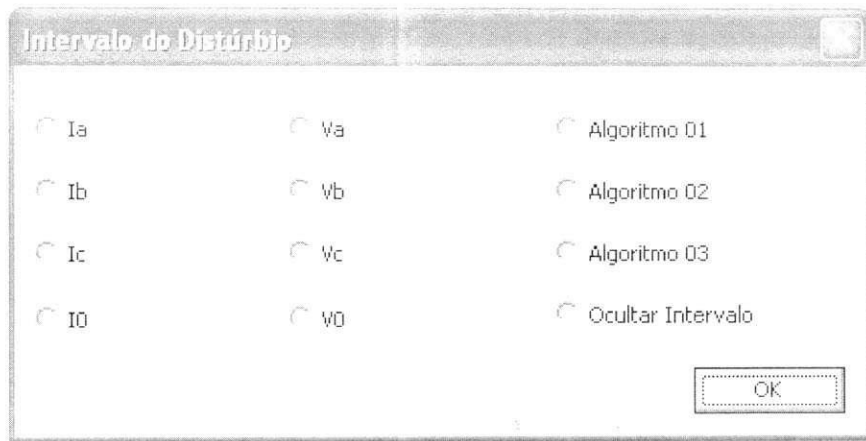


Figura 8 - Interface para a escolha dos sinais de entrada.

a) Registro1: 2003_07_09_14_02_51, falta AT

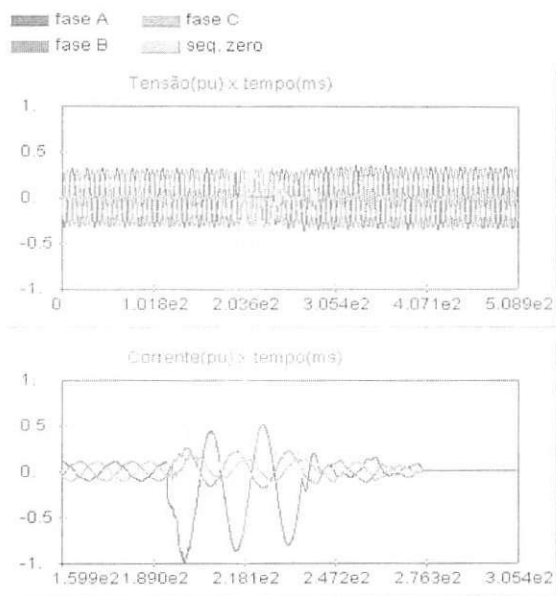


Figura 9 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

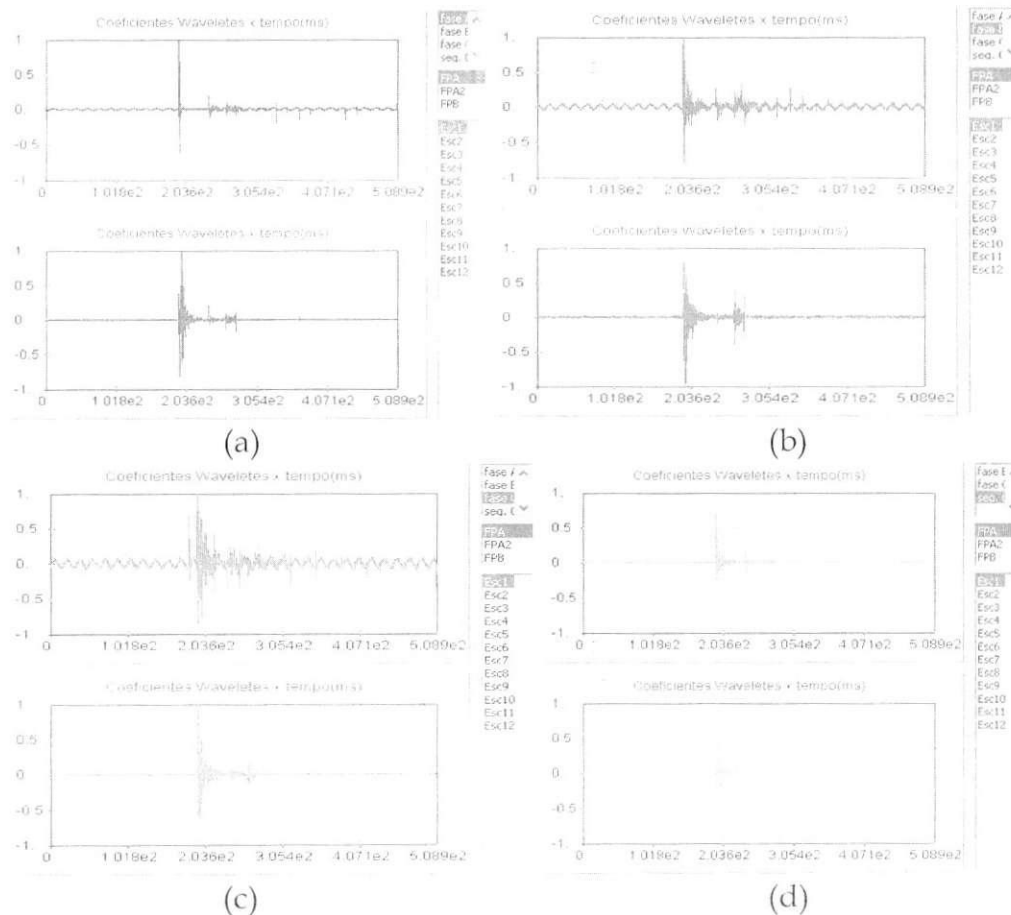


Figura 10 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Seqüência zero.

- Considerando I_a , I_b e I_c (Figura 11) - algoritmo I: Apenas o início da falta foi detectado corretamente. No caso do final da falta, o instante final detectado foi aquele no qual as correntes se anularam. O correto seria o instante no qual a proteção atuou.

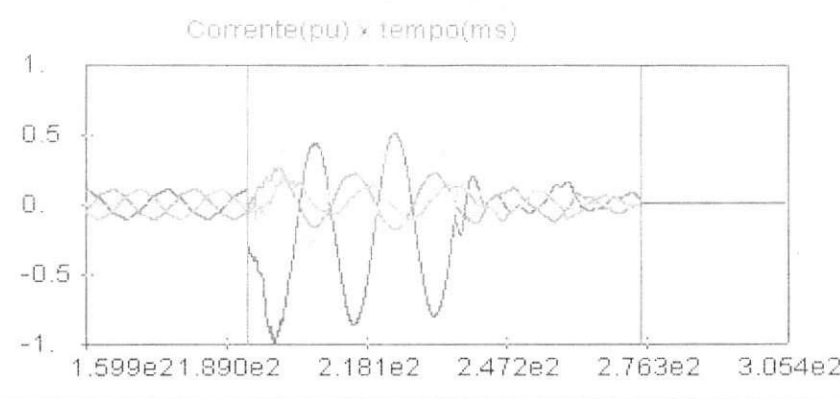


Figura 11 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_a (Figura 12): apenas o início da falta detectado corretamente.

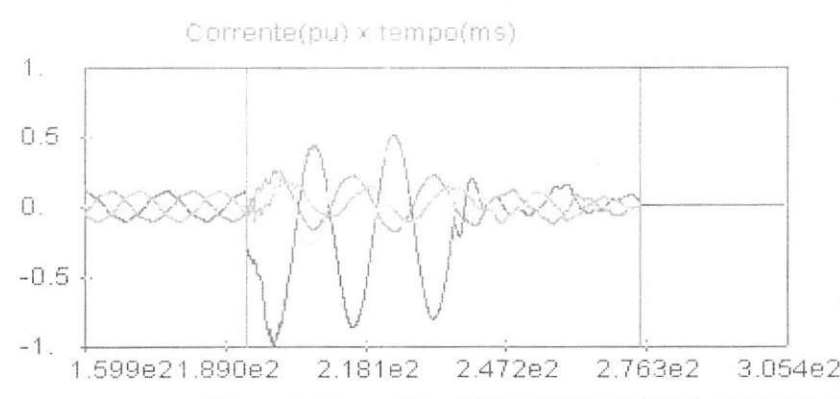


Figura 12 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_b (Figura 13): apenas o início da falta detectado corretamente.

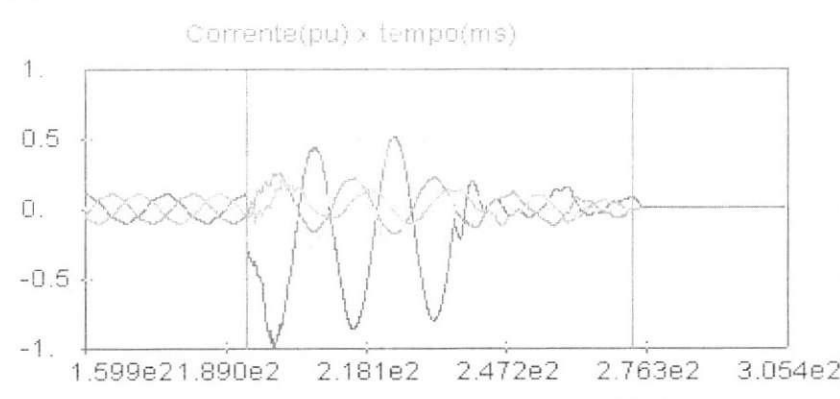


Figura 13 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 14): apenas o início da falta detectado corretamente.

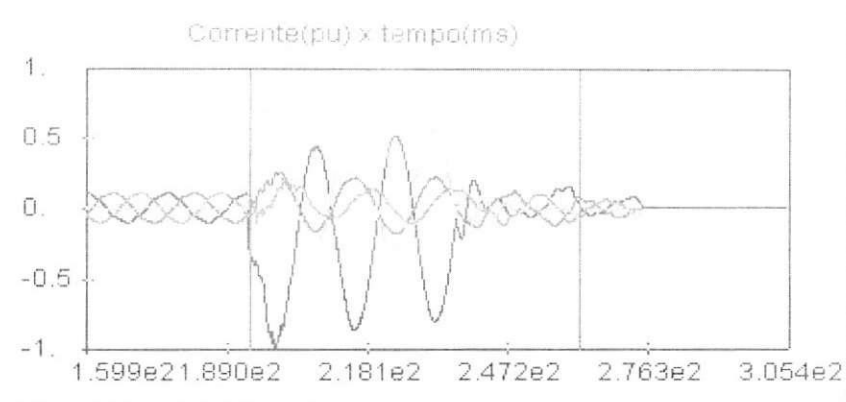


Figura 14 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 15): apenas o início da falta detectado corretamente.

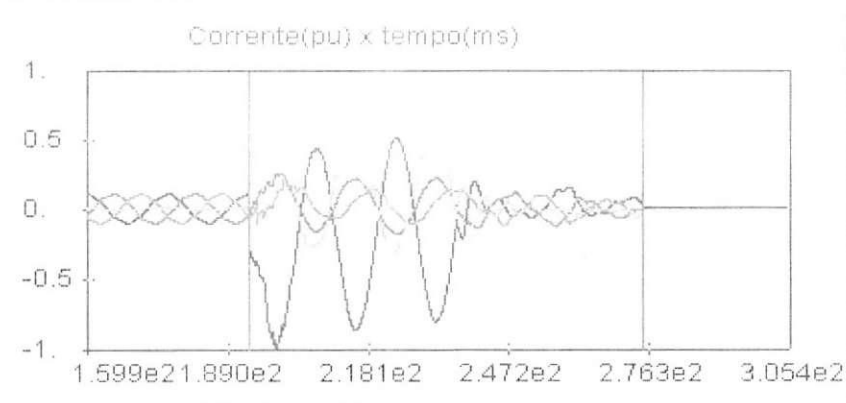


Figura 15 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 16): intervalo da falta detectado corretamente.

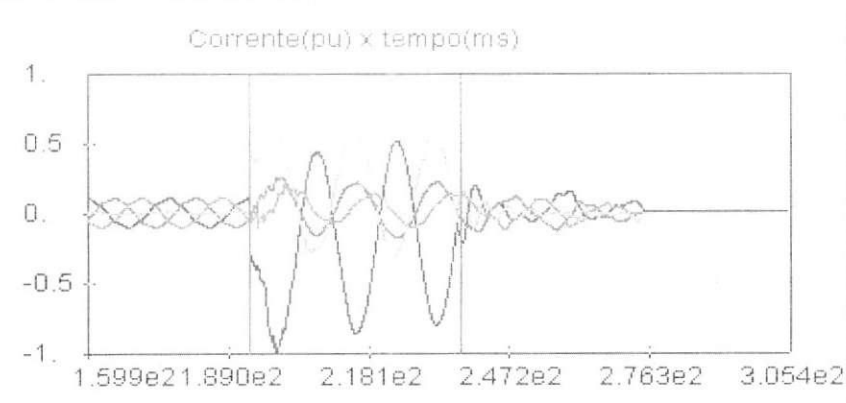


Figura 16 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

b) Registro2: 2003_07_27_17_58_20, falta CT

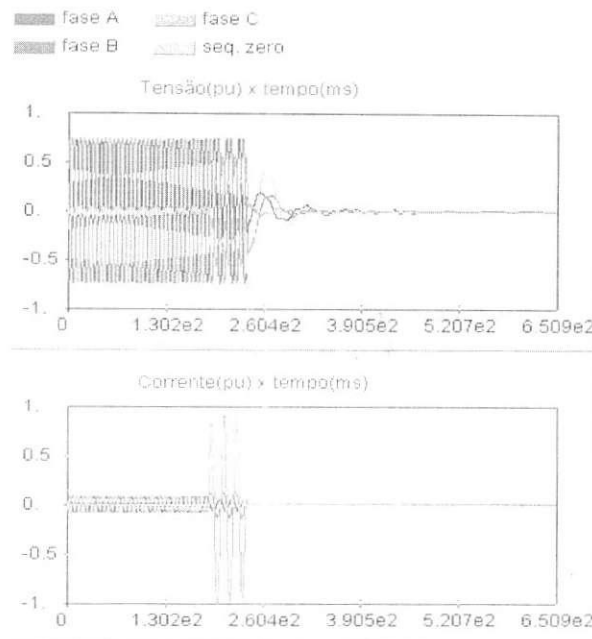


Figura 17 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

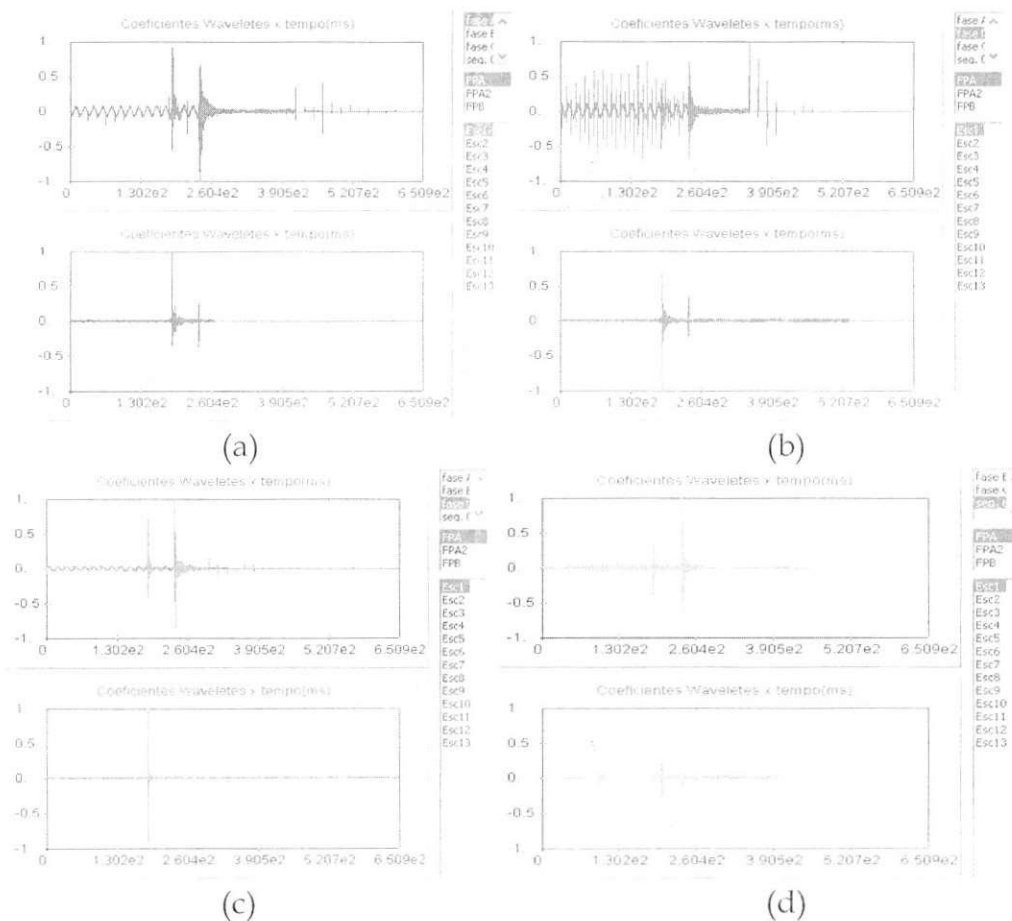


Figura 18 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando Ia, Ib e Ic (Figura 19) – algoritmo I: o início e o fim da falta foram detectados corretamente. Note que neste caso, assim que a proteção atuou, não houve transitórios consideráveis. Com isso, o instante que a proteção atuou é aproximadamente o instante em que as correntes se anularam.

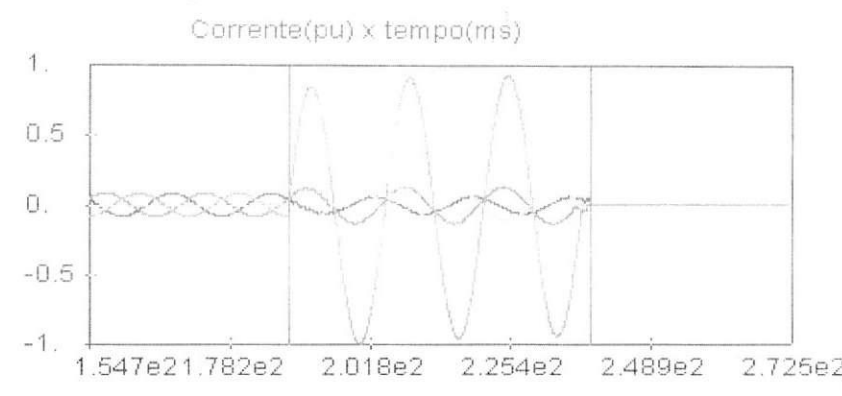


Figura 19 – Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ia (Figura 20): intervalo da falta detectado corretamente.

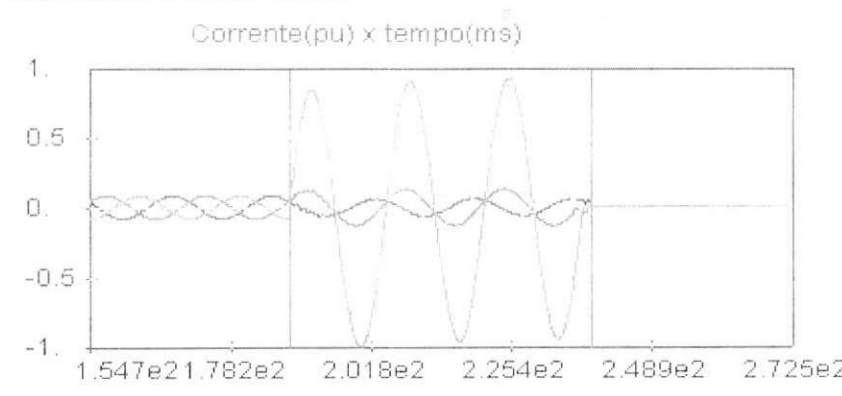


Figura 20 – Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ib (Figura 21): intervalo da falta detectado corretamente.

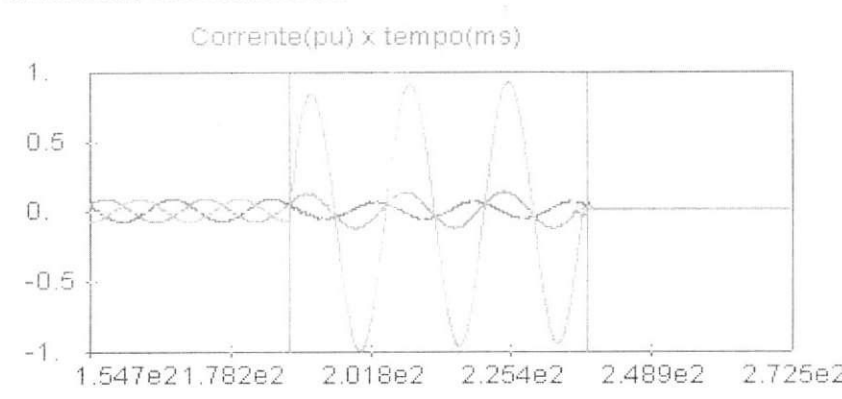


Figura 21 – Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 22): intervalo da falta detectado corretamente.

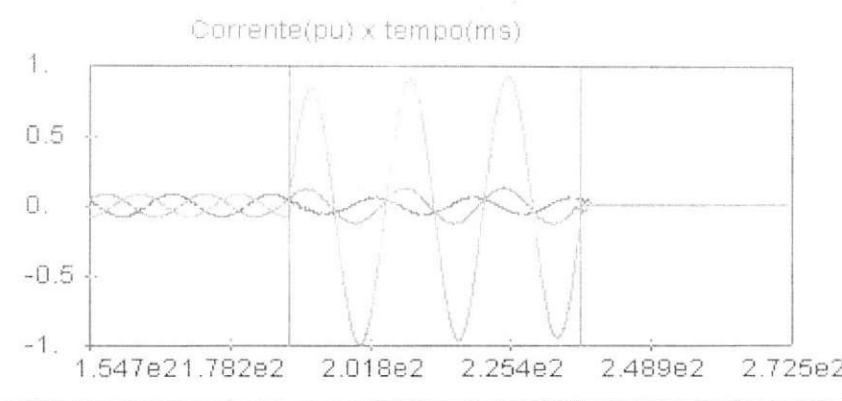


Figura 22 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 23): apenas o início da falta detectado corretamente.

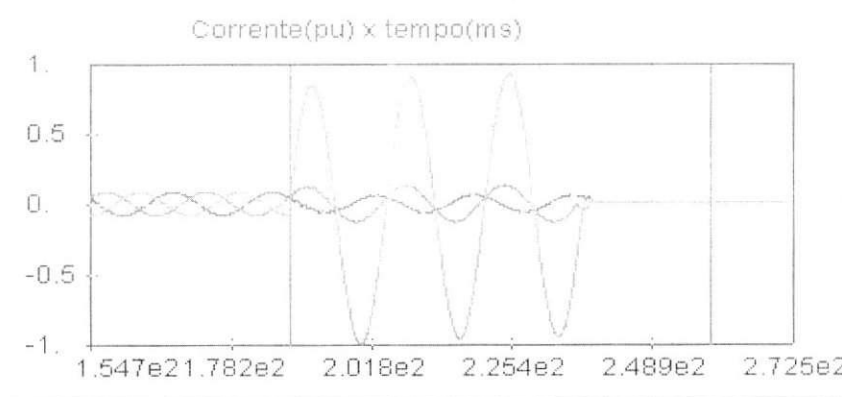


Figura 23 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 24): apenas o início da falta detectado corretamente.

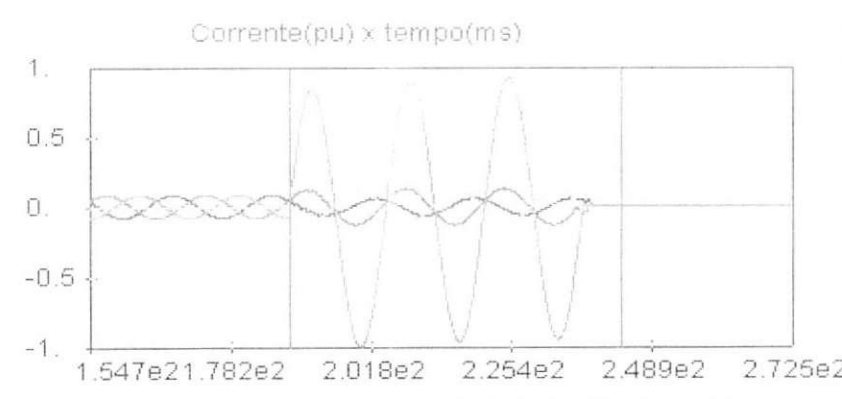


Figura 24 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

c) Registro3: 2004_02_27_10_23_13, falta CT

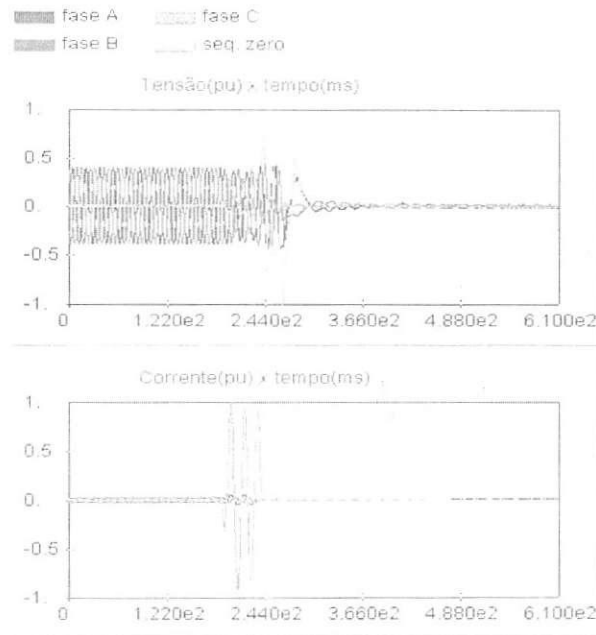


Figura 25 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

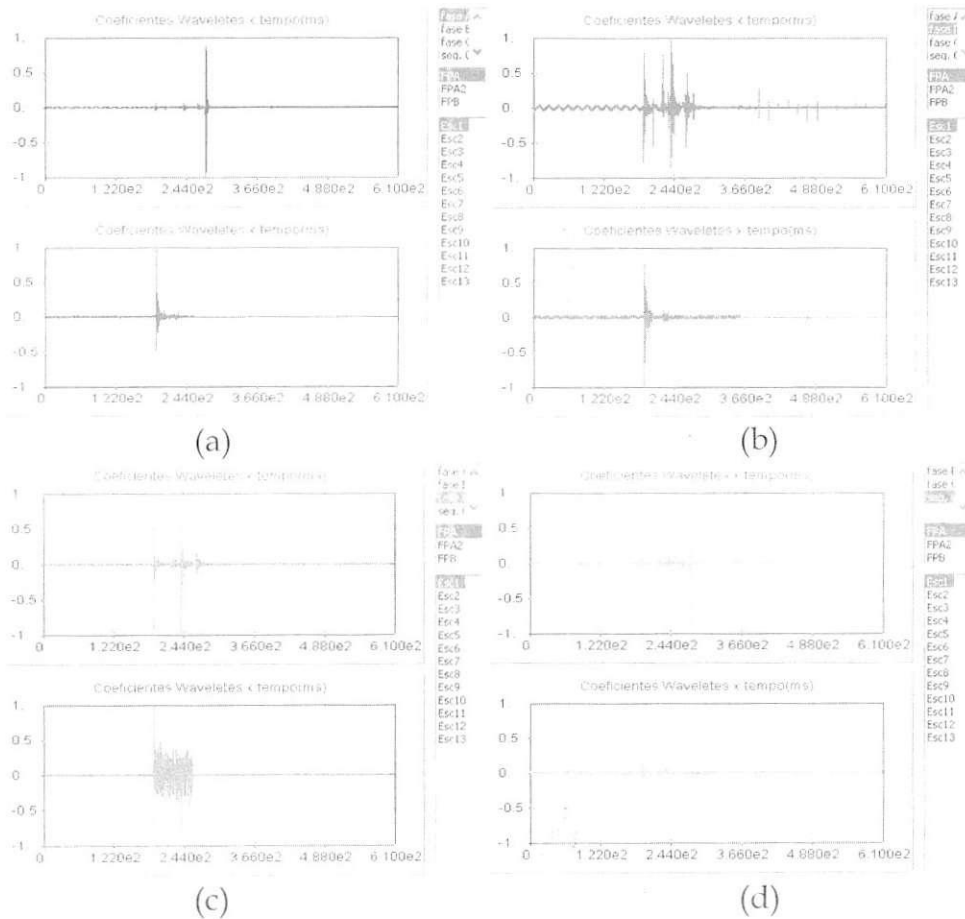


Figura 26 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando Ia, Ib e Ic (Figura 27) - algoritmo I: apenas o início da falta detectado corretamente.

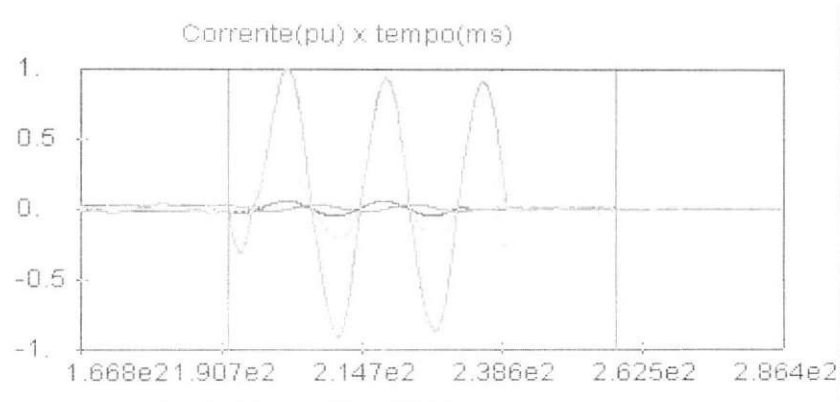


Figura 27 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ia (Figura 28): apenas o início da falta detectado corretamente.

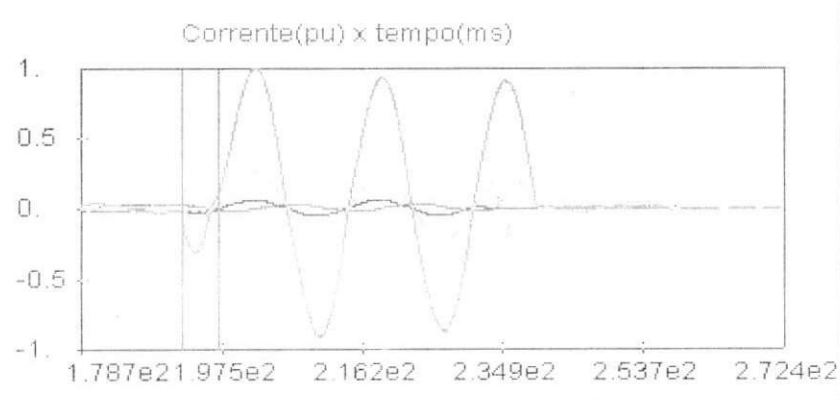


Figura 28 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ib (Figura 29): apenas o início da falta detectado corretamente.

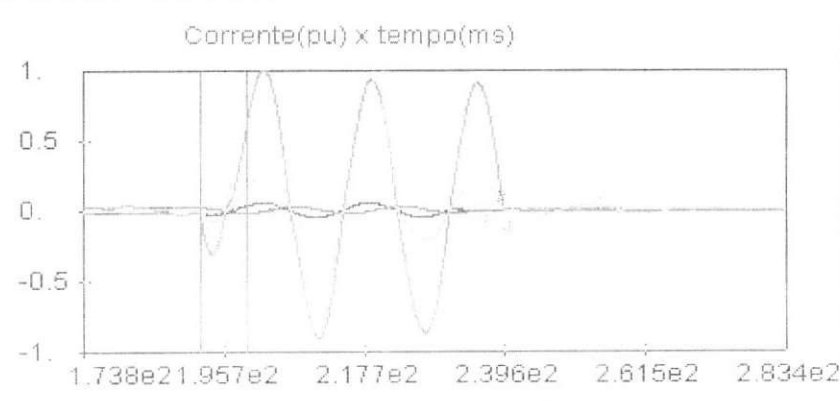


Figura 29 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 30): apenas o início da falta detectado corretamente.

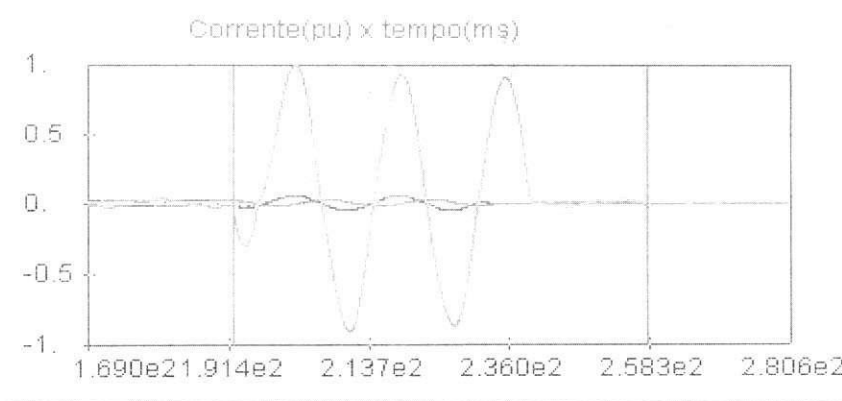


Figura 30 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 31): intervalo da falta detectado corretamente.

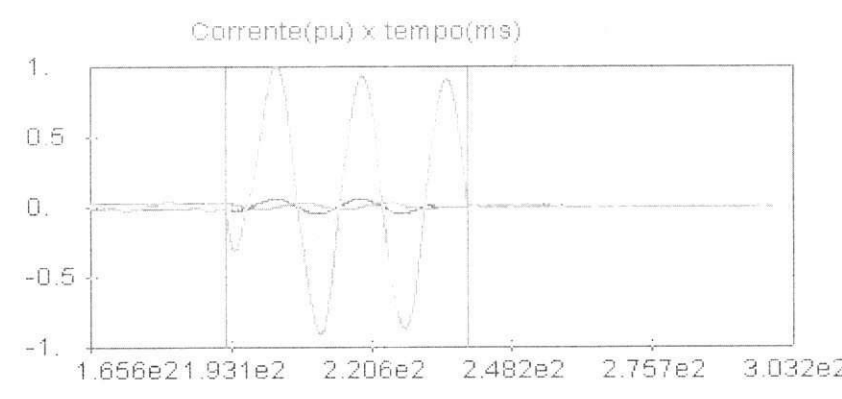


Figura 31 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 32): apenas o início da falta detectado corretamente.

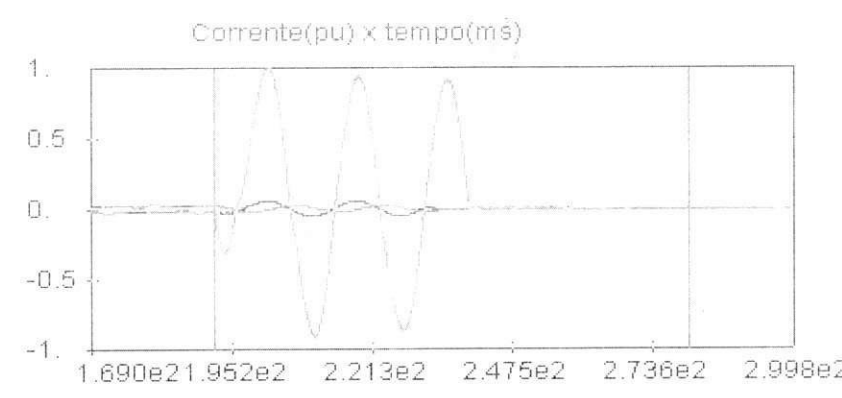


Figura 32 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

d) Registro4: 2004_02_27_11_02_06, falta CT

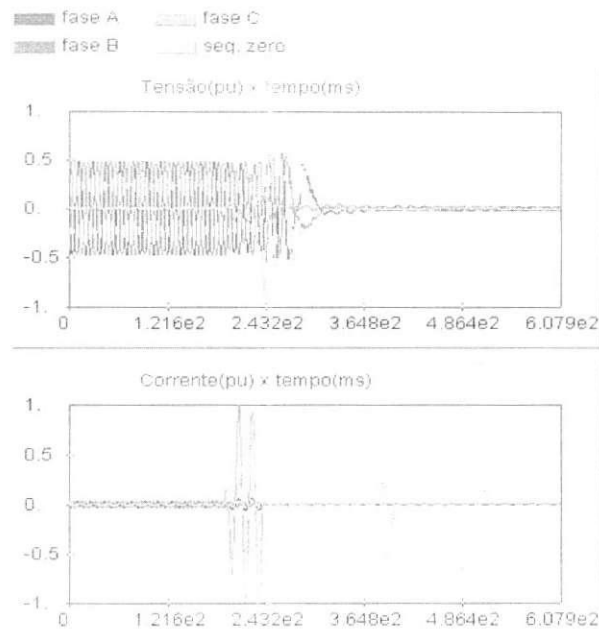


Figura 33 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

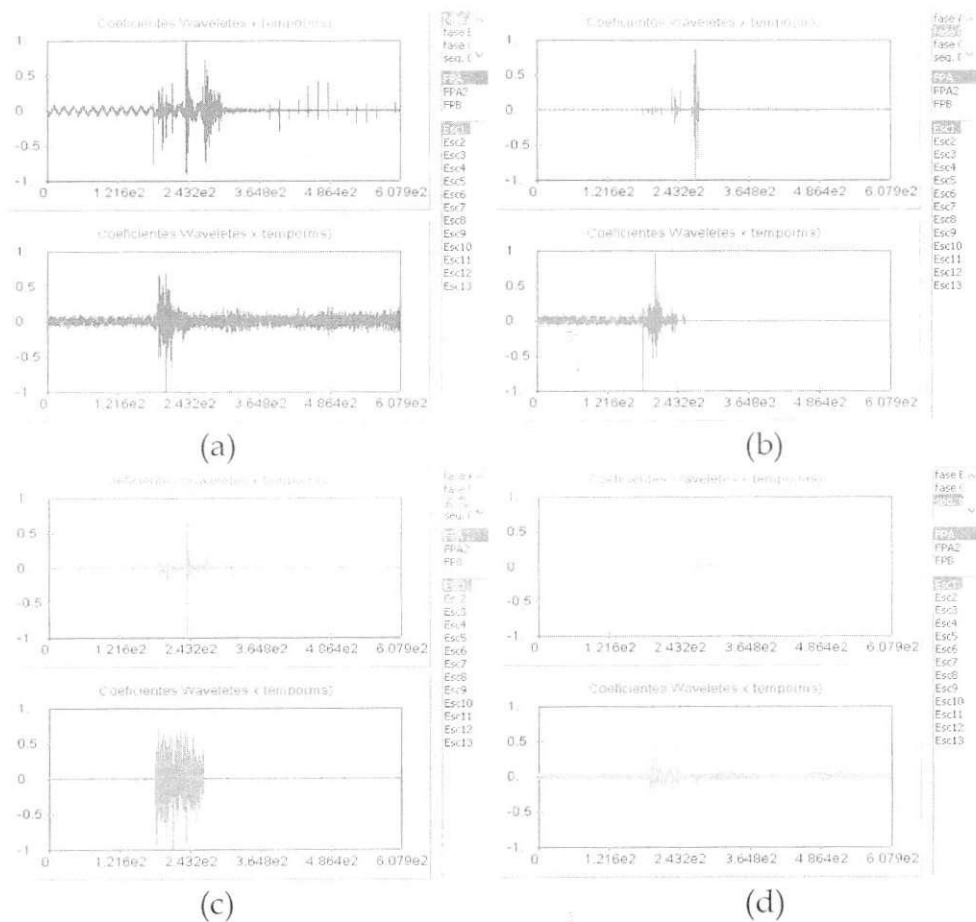


Figura 34 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando I_a , I_b e I_c (Figura 35) - algoritmo I: erro na detecção completa do intervalo.

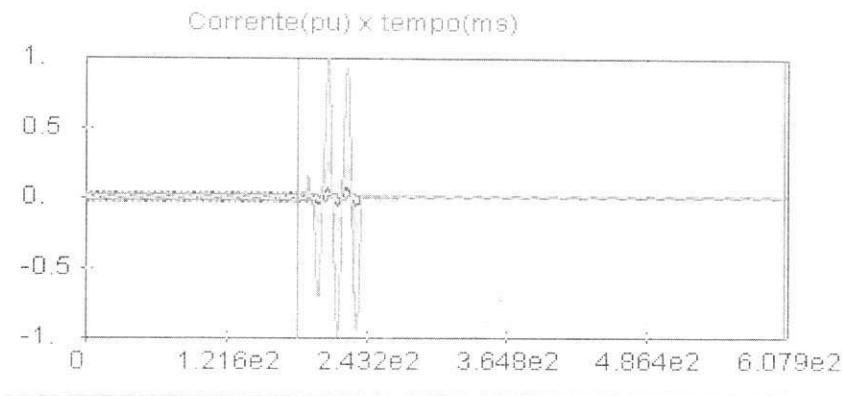


Figura 35 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_a (Figura 36): apenas o início da falta detectado corretamente.

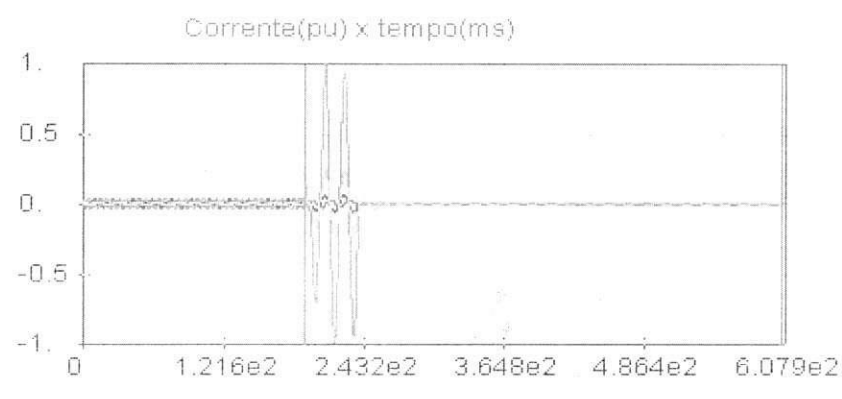


Figura 36 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_b (Figura 37): apenas o final da falta detectado corretamente.

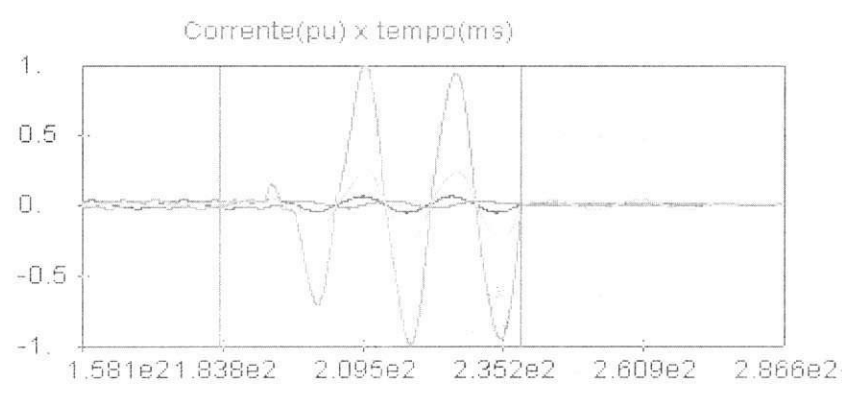


Figura 37 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 38) - algoritmo I: erro na detecção completa do intervalo.

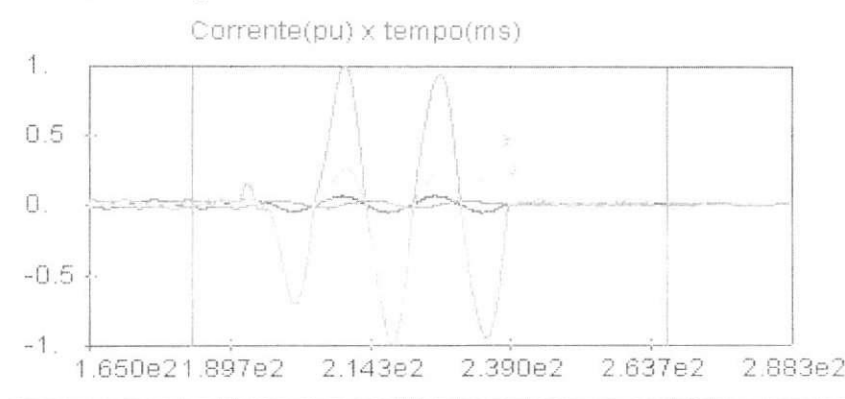


Figura 38 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 39): intervalo da falta detectado corretamente.

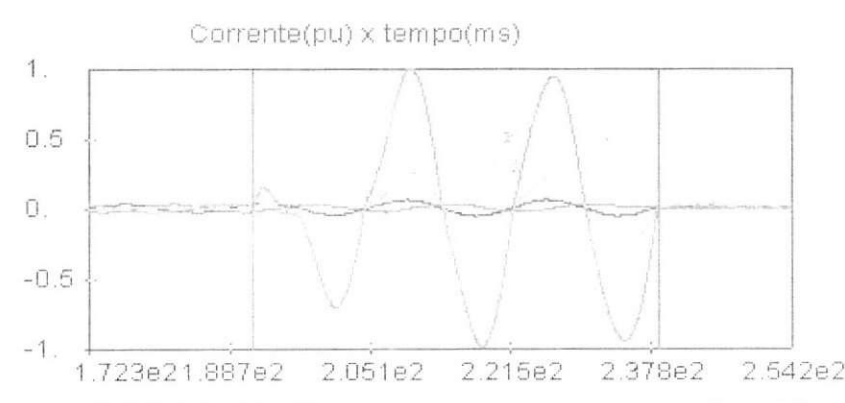


Figura 39 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 40): apenas o início da falta detectado corretamente.

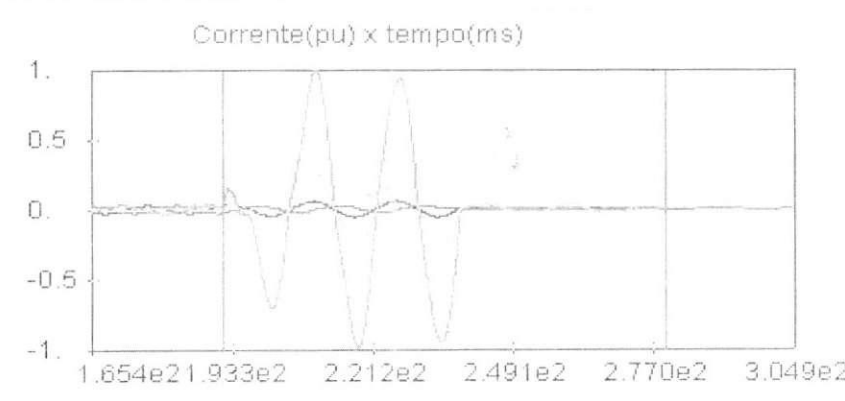


Figura 40 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

e) Registro5: 2004_04_26_16_57_29, falta AB

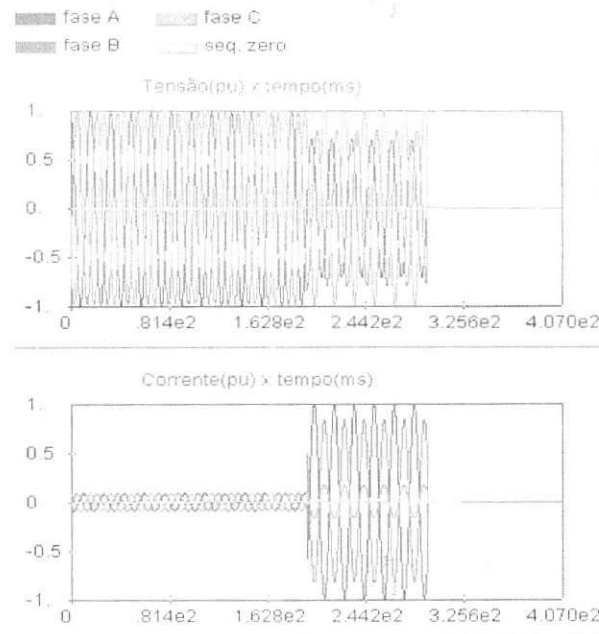


Figura 41 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

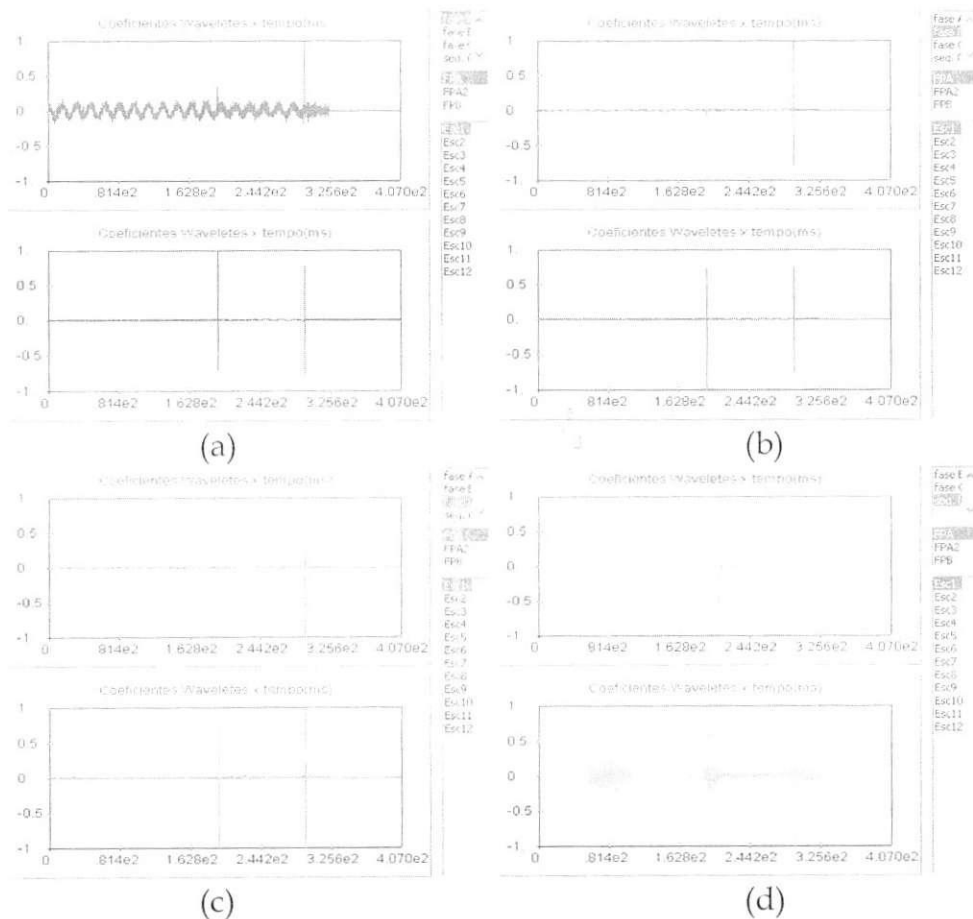


Figura 42 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando I_a , I_b e I_c (Figura 43) - algoritmo I: intervalo da falta detectado corretamente.

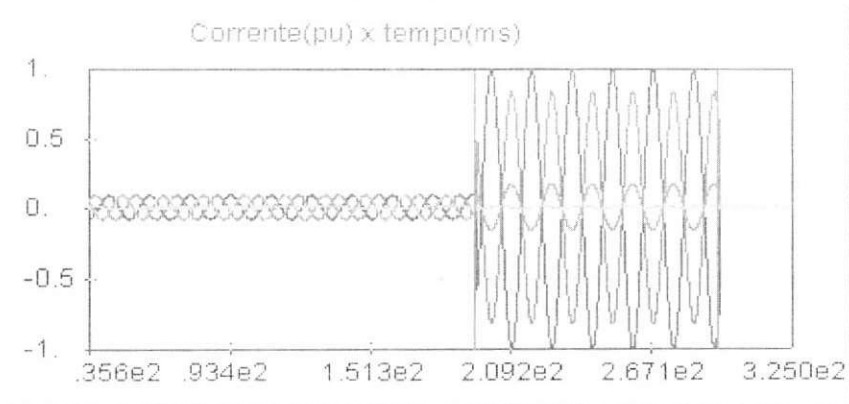


Figura 43 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_a (Figura 44): intervalo da falta detectado corretamente.

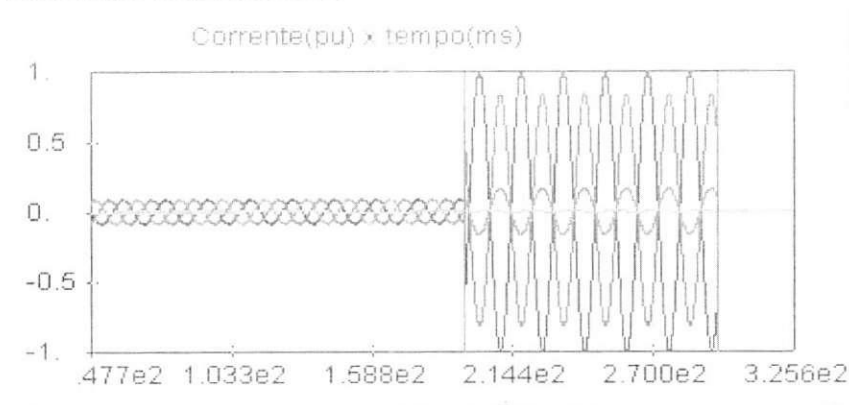


Figura 44 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_b (Figura 45): intervalo de falta detectado corretamente.

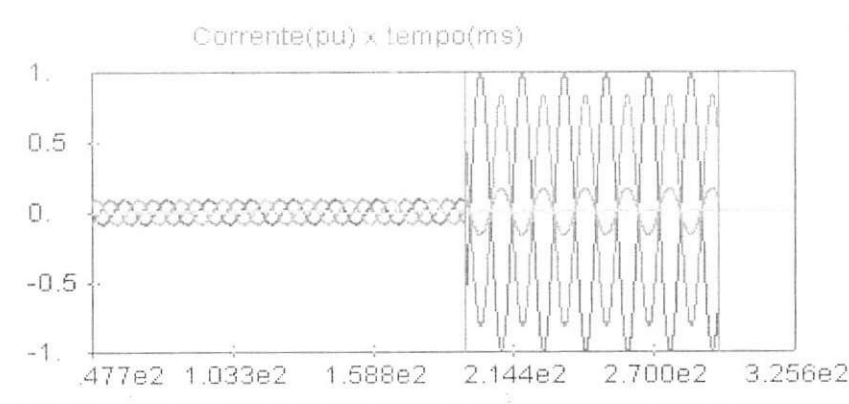


Figura 45 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 46): intervalo da falta detectado corretamente.

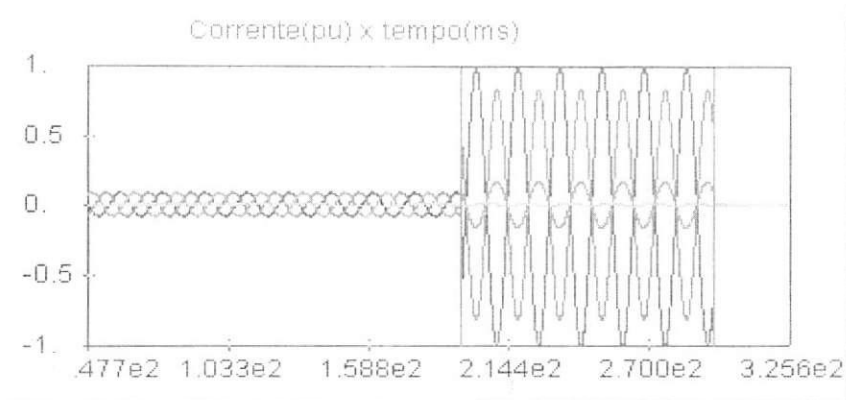


Figura 46 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 47): erro na detecção completa do intervalo.

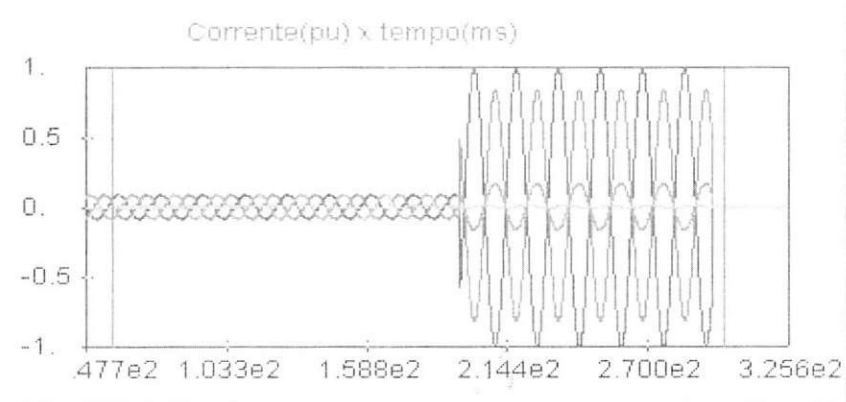


Figura 47 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 48): erro na detecção completa do intervalo.

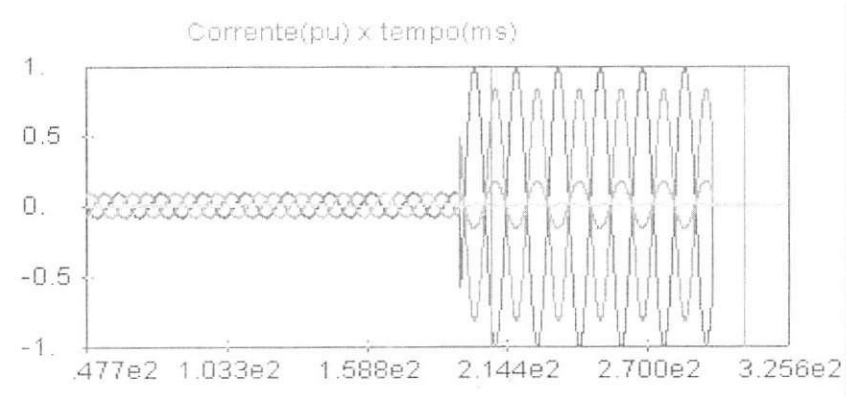


Figura 48 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

f) Registro6: 2004_02_09_10_55_21, falta CT

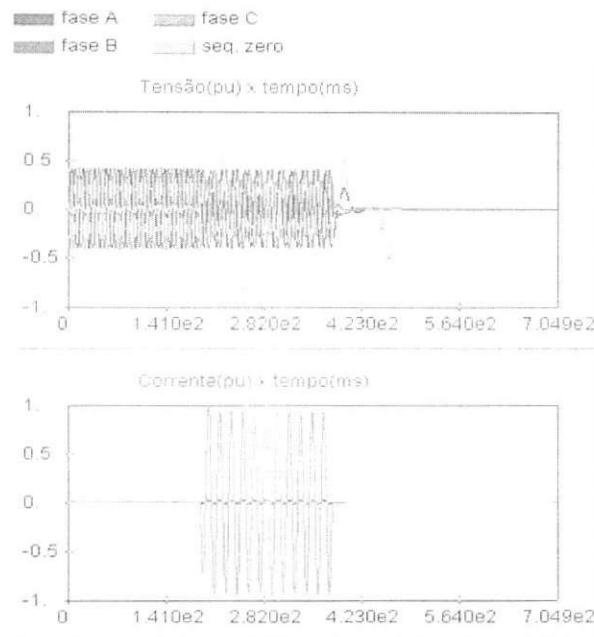


Figura 49 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

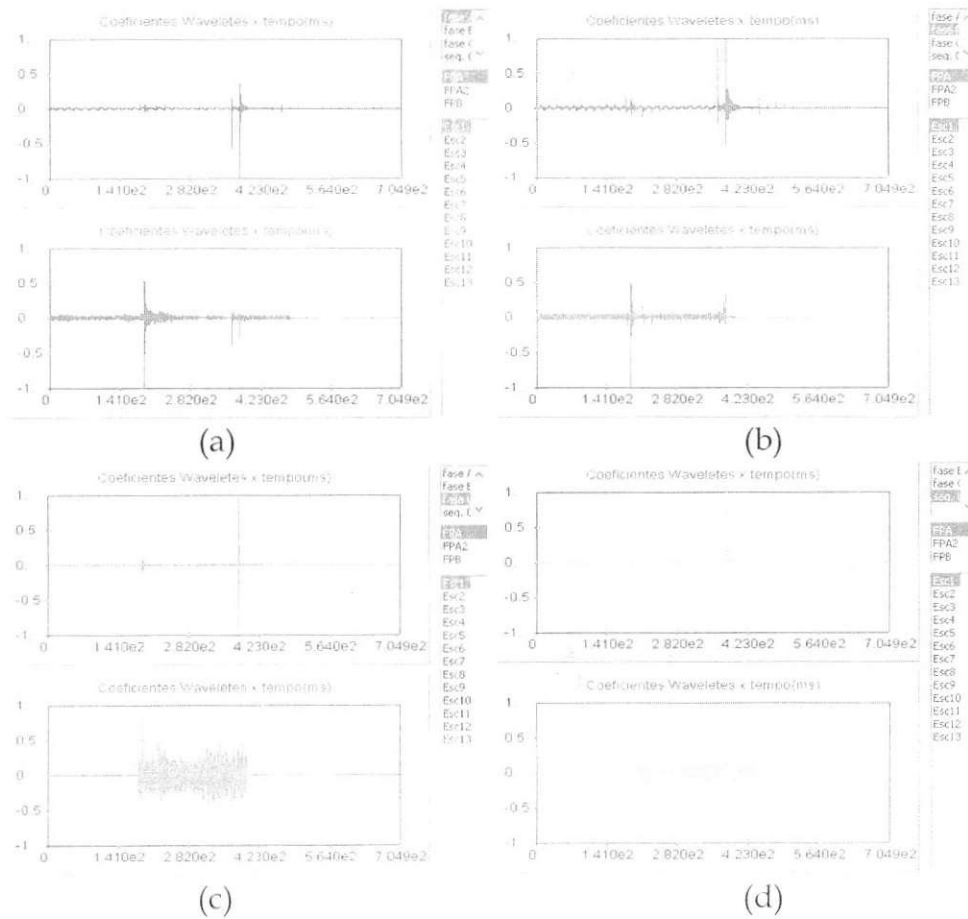


Figura 50 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando Ia, Ib e Ic (Figura 51) - algoritmo I: erro na detecção completa do intervalo.

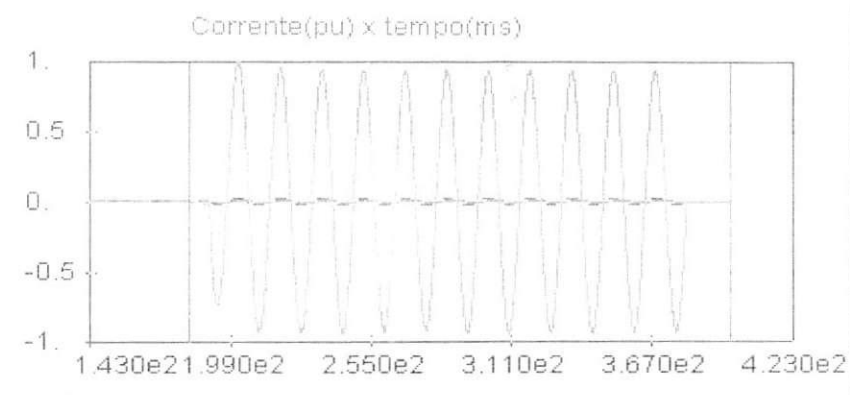


Figura 51 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ia (Figura 52): intervalo da falta detectado corretamente.

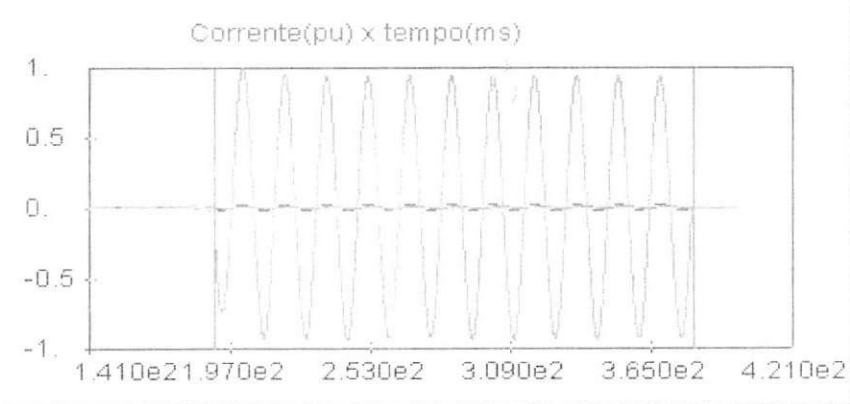


Figura 52 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ib (Figura 53): intervalo da falta detectado corretamente.

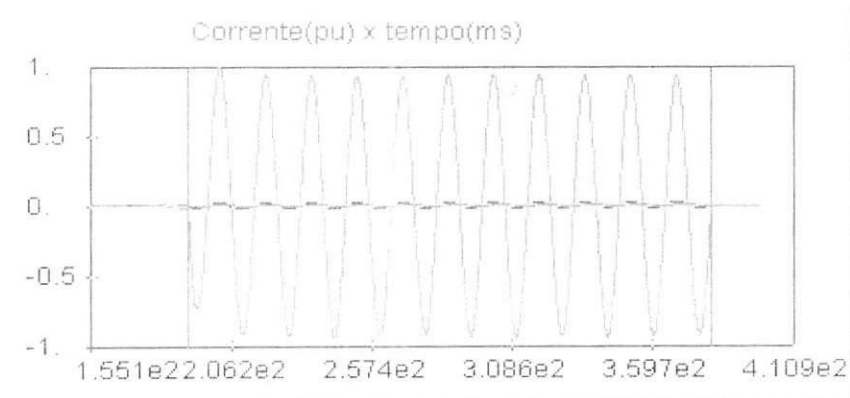


Figura 53 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 54): erro na detecção completa do intervalo.

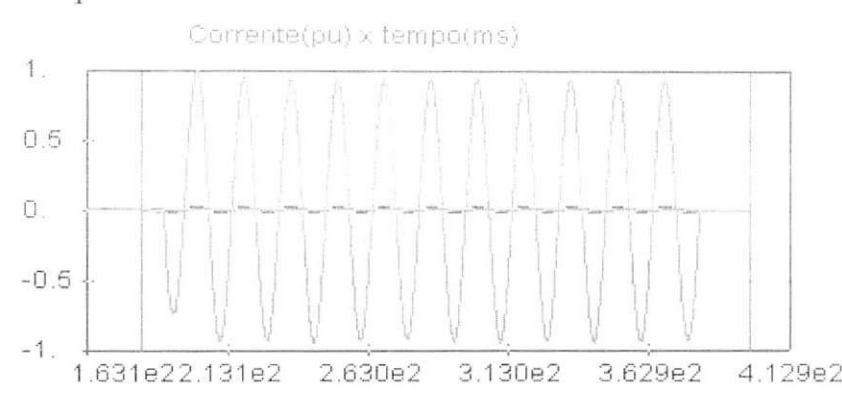


Figura 54 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 55): apenas o início da falta detectado corretamente.

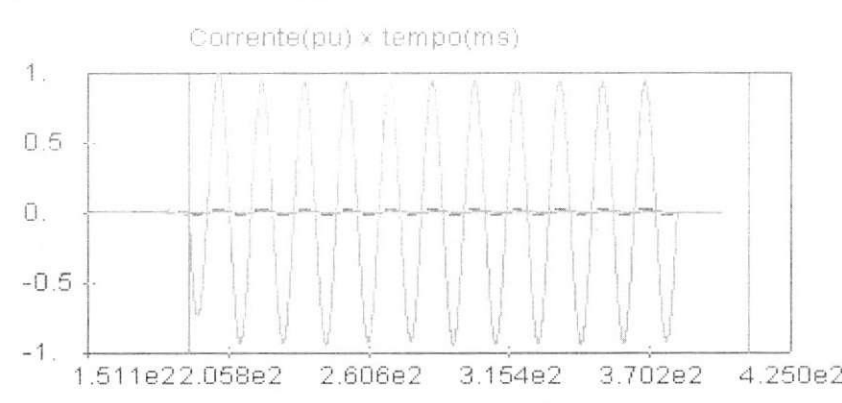


Figura 55 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 56): apenas o final da falta detectado corretamente.

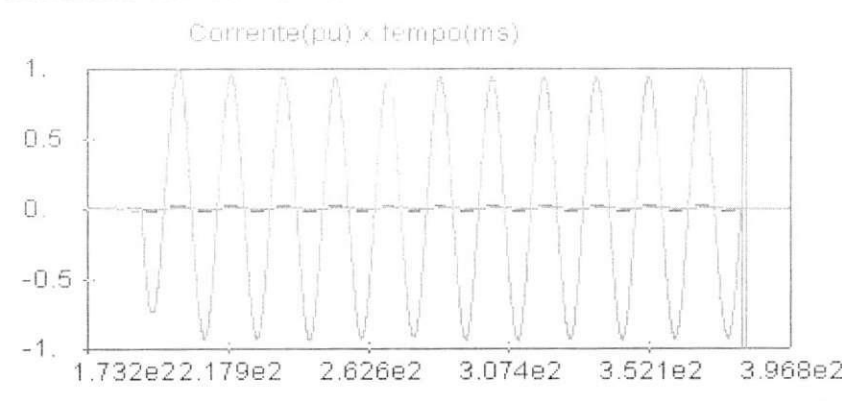


Figura 56 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

g) Registro7: 2004_03_29_06_11_12, falta BT

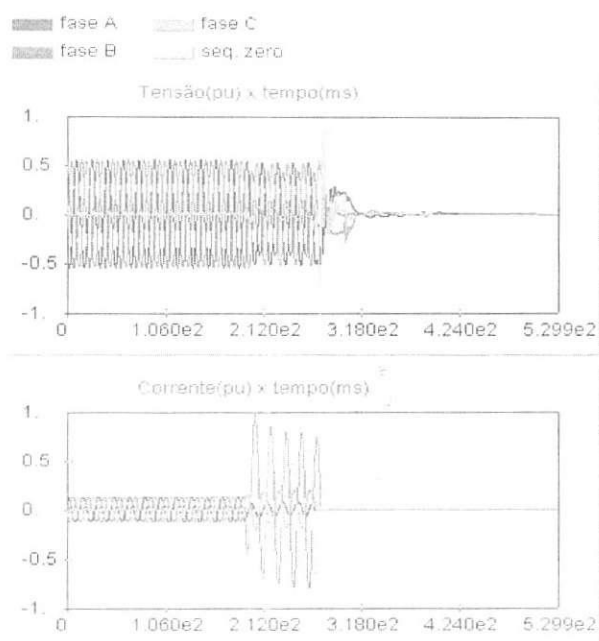


Figura 57 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

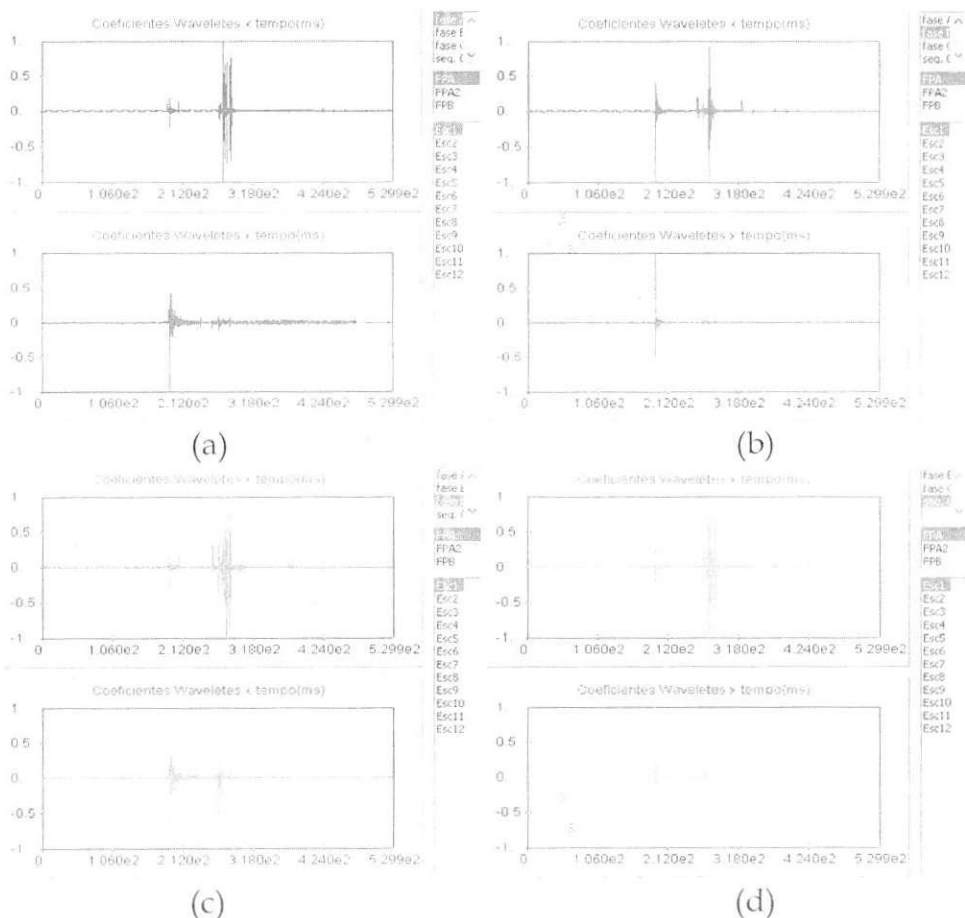


Figura 58 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando I_a , I_b e I_c (Figura 59) - algoritmo I: apenas o início da falta detectado corretamente.

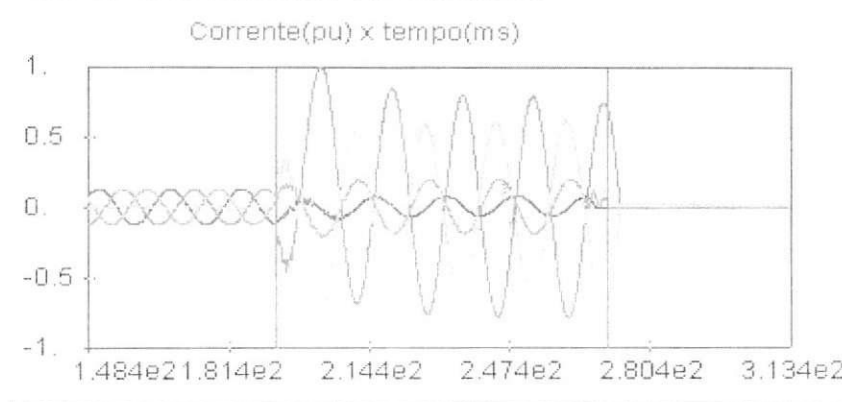


Figura 59 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_a (Figura 60): apenas o início da falta detectado corretamente.

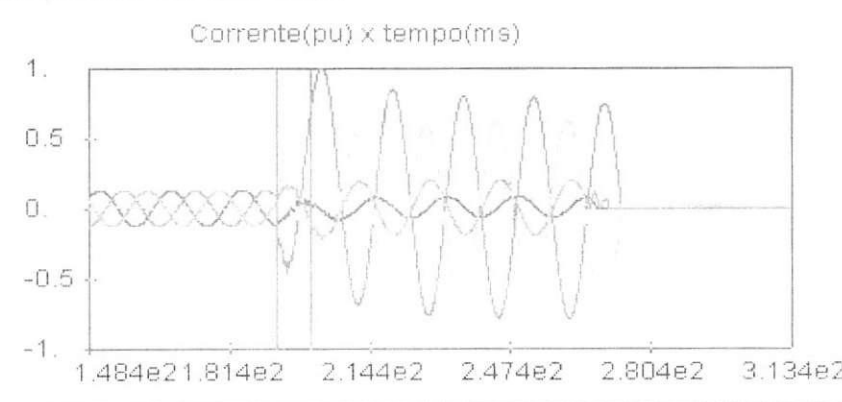


Figura 60 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_b (Figura 61): apenas o início da falta detectado corretamente.

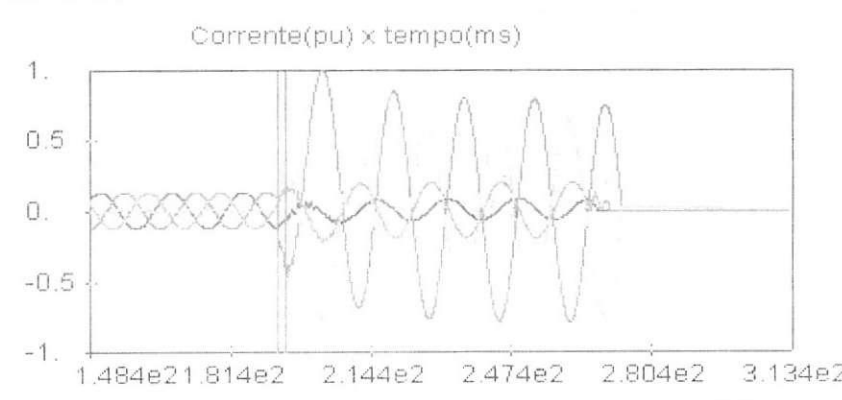


Figura 61 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 62): apenas o início da falta detectado corretamente.

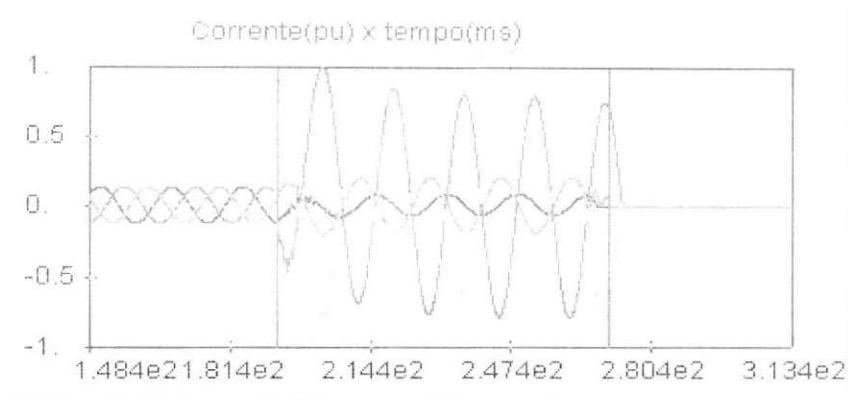


Figura 62 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 63): apenas o início da falta detectado corretamente.

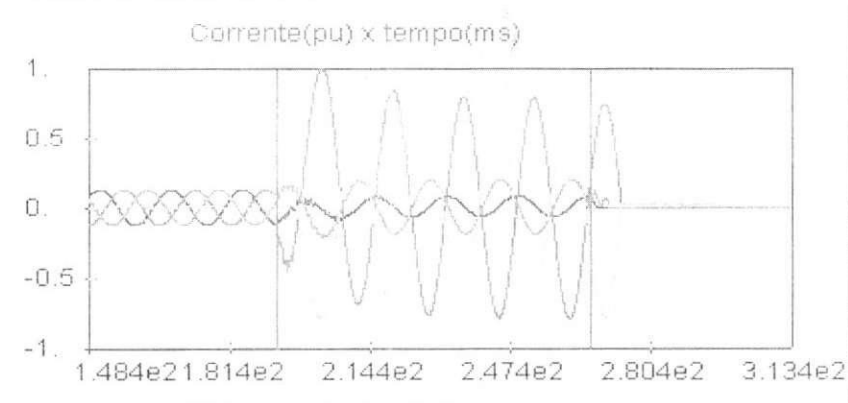


Figura 63 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 64): apenas o início da falta detectado corretamente.

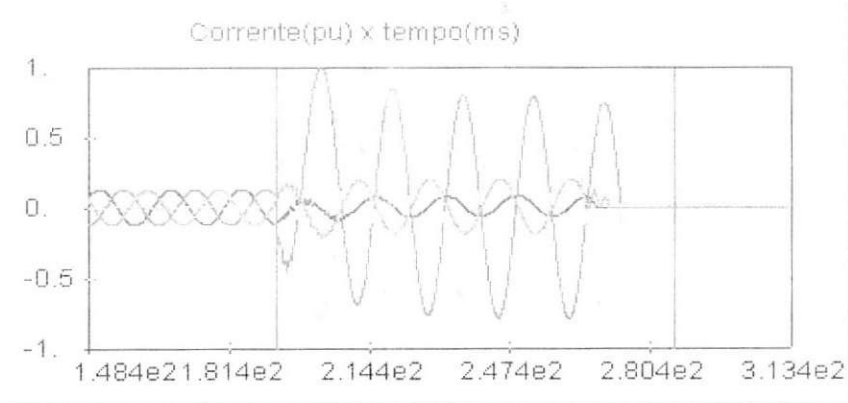


Figura 64 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

h) Registro8: 2004_03_16_22_49_36, falta BT

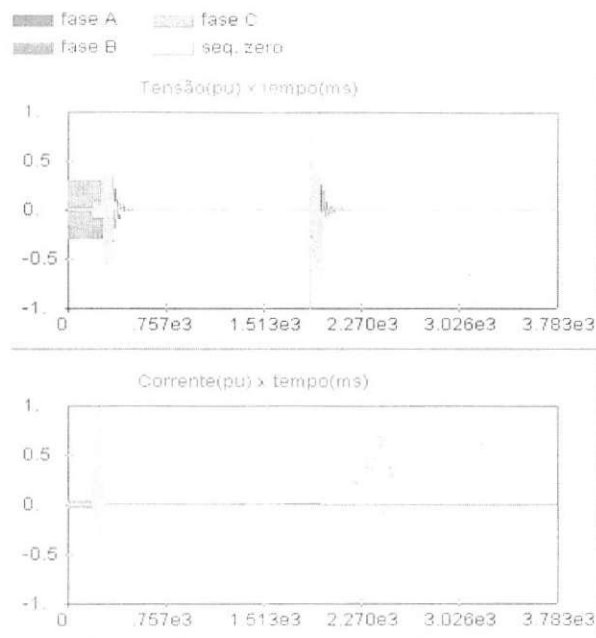


Figura 65 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

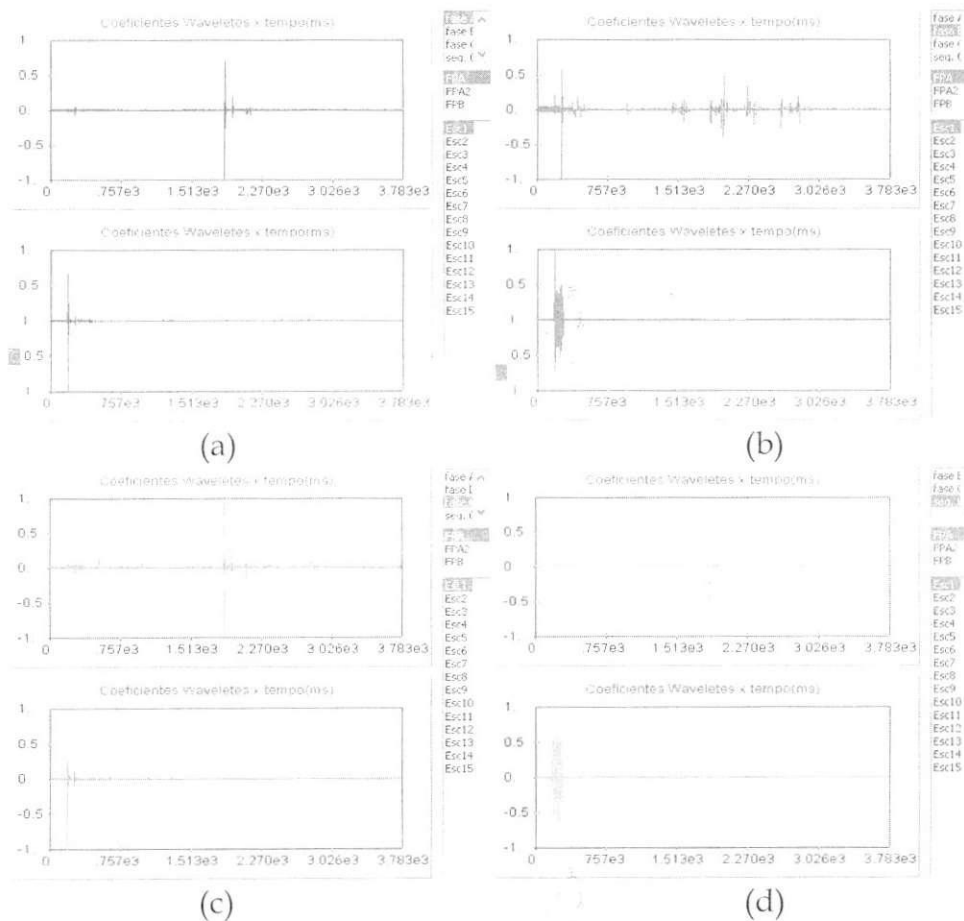


Figura 66 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando I_a , I_b e I_c (Figura 67) - algoritmo I: erro na detecção completa do intervalo.

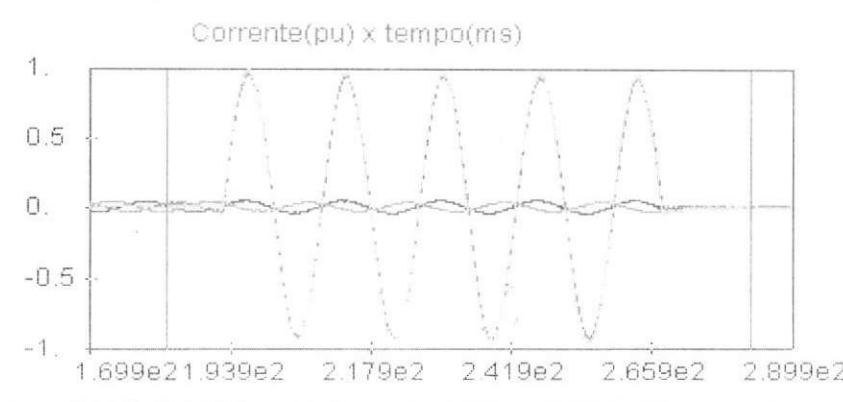


Figura 67 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_a (Figura 68): apenas o início da falta detectado corretamente.

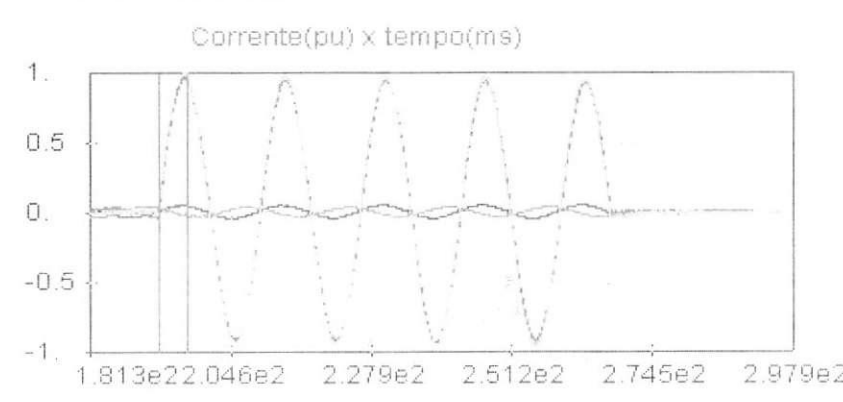


Figura 68 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_b (Figura 69): erro na detecção completa do intervalo.

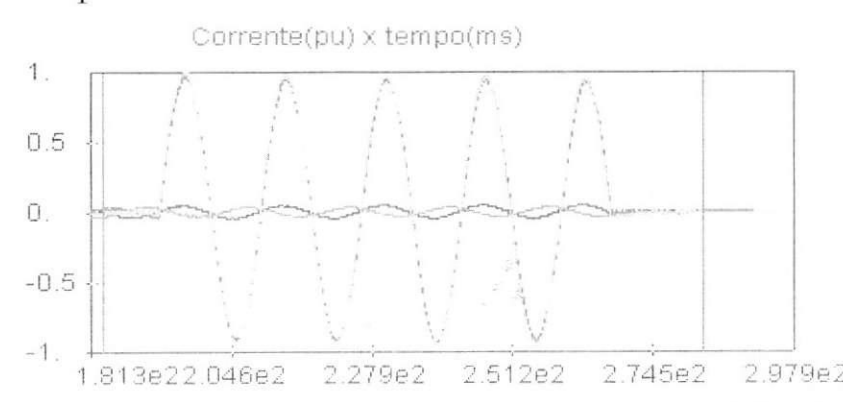


Figura 69 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 70): apenas o início da falta detectado corretamente.

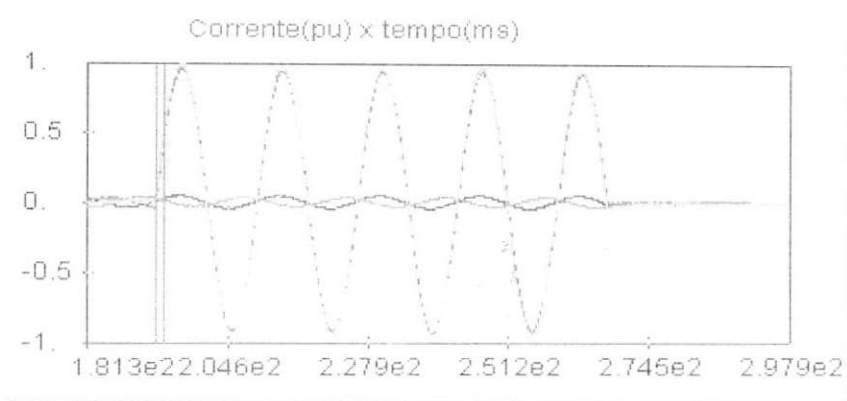


Figura 70 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I0 (Figura 71): erro na detecção completa do intervalo.

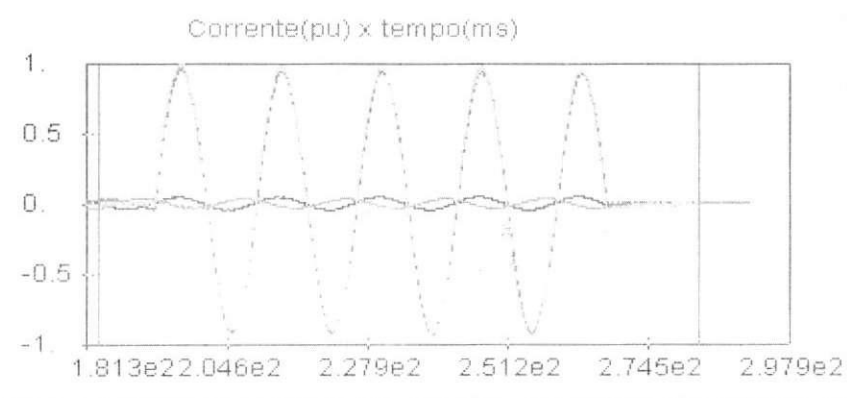


Figura 71 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V0 (Figura 72): erro na detecção completa do intervalo.

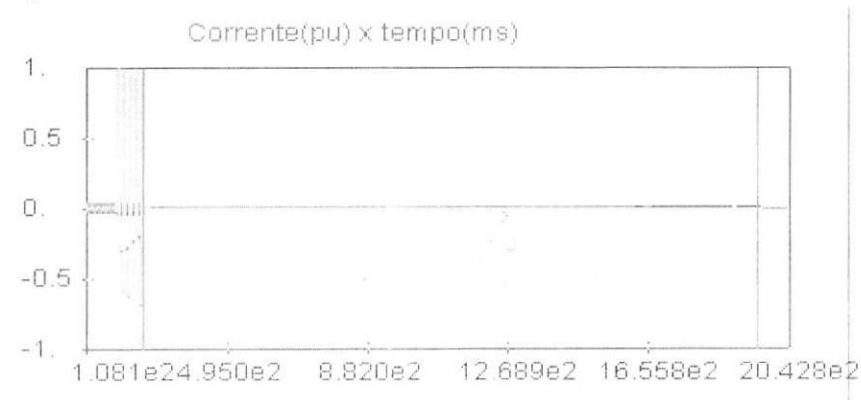


Figura 72 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

i) Registro9: 2004_08_16_01_09_05, falta AB

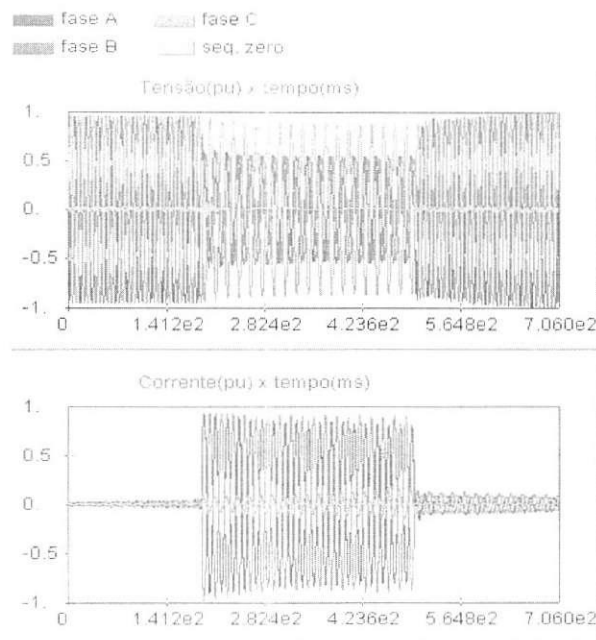


Figura 73 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

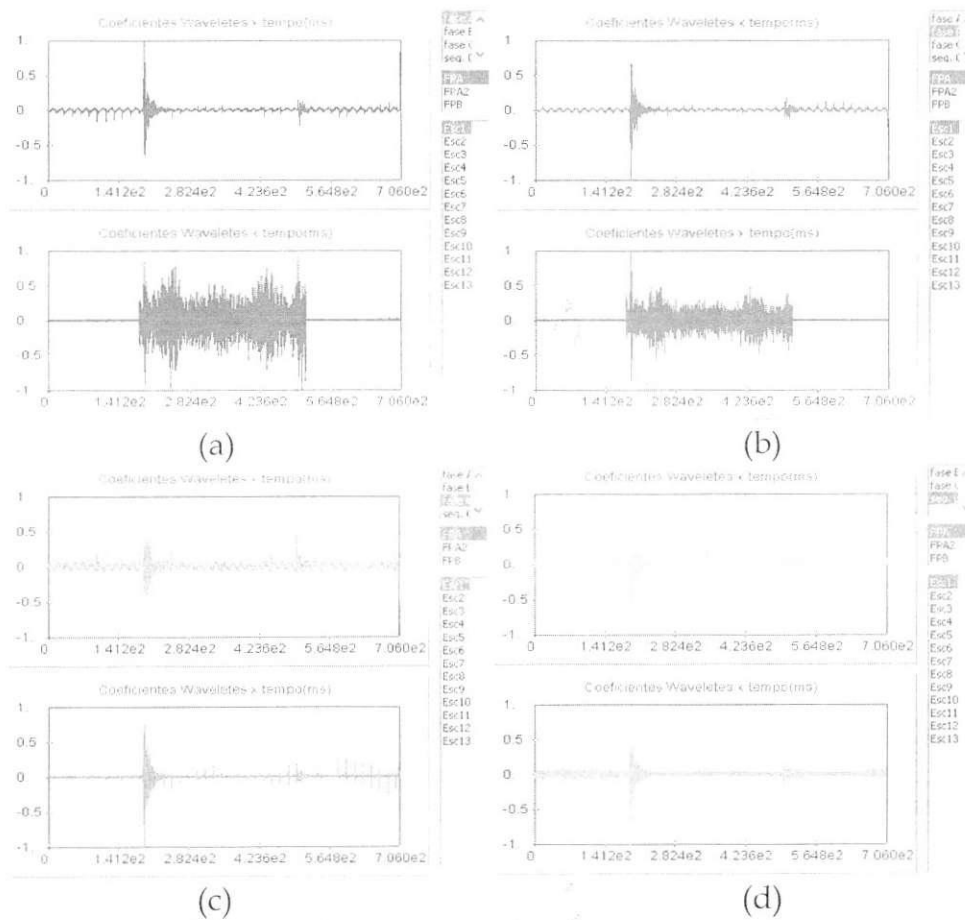


Figura 74 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando I_a , I_b e I_c (Figura 75) - algoritmo I: erro na detecção completa do intervalo.

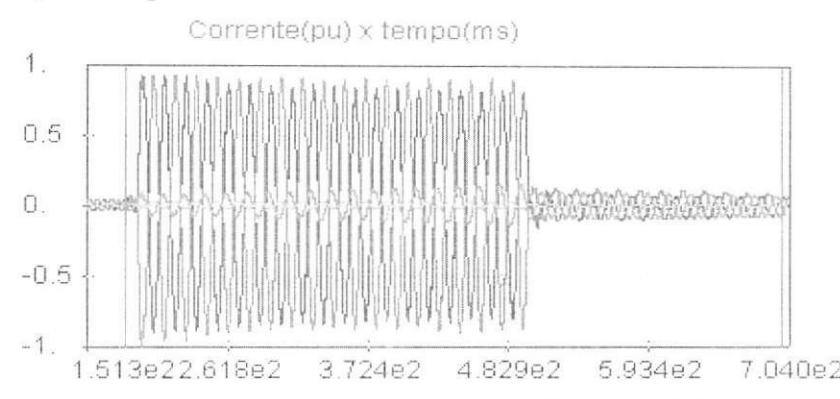


Figura 75 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_a (Figura 76): erro na detecção completa do intervalo.

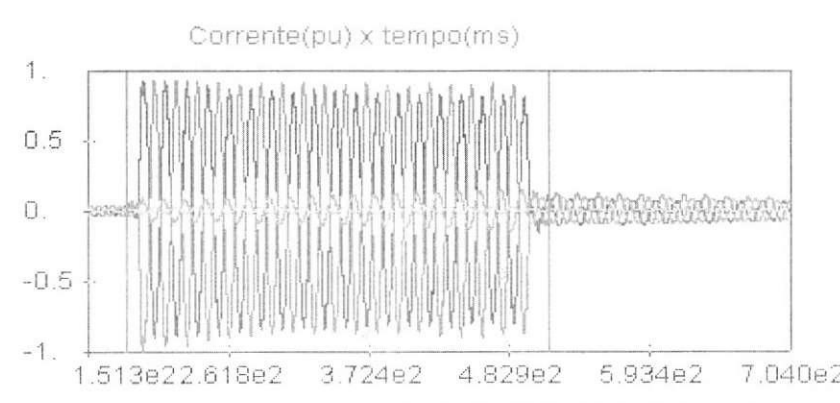


Figura 76 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_b (Figura 77): erro na detecção completa do intervalo.

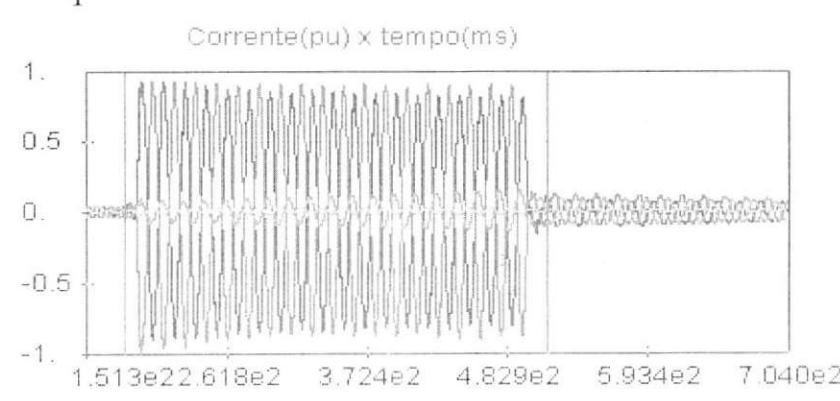


Figura 77 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 78): apenas o início da falta detectado corretamente.

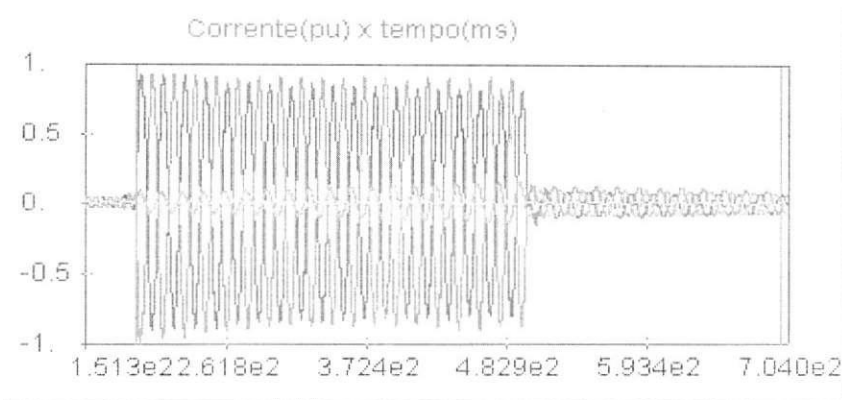


Figura 78 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 79): intervalo da falta detectado corretamente.

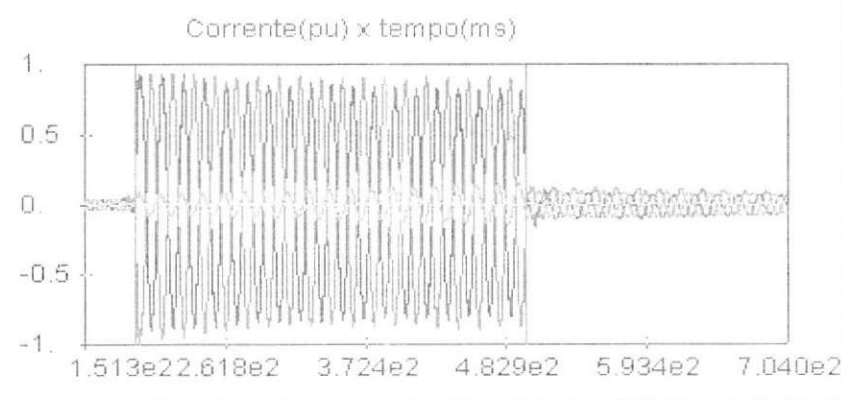


Figura 79 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 80): apenas o início da falta detectado corretamente.

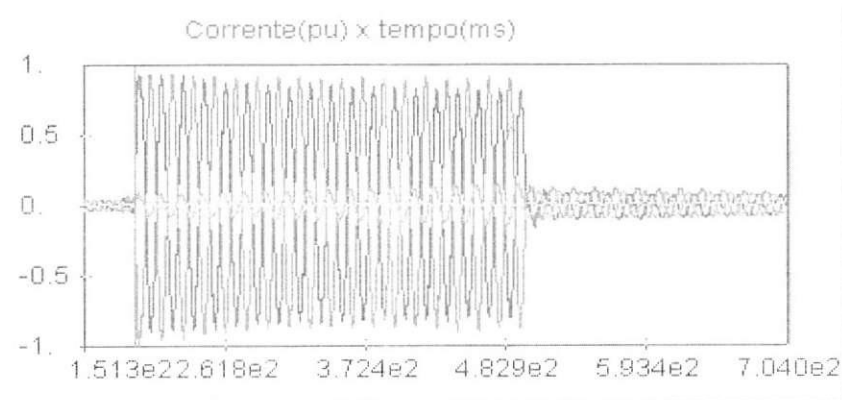


Figura 80 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

j) Registro10: 2003_11_25_15_11_44, falta ACT

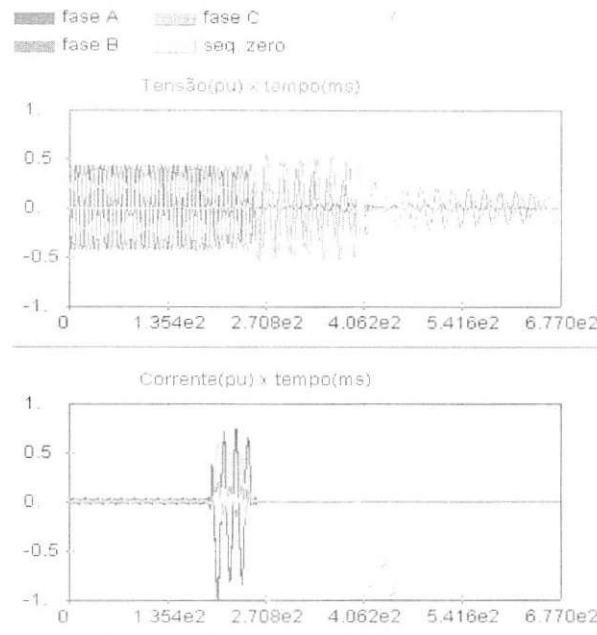


Figura 81 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

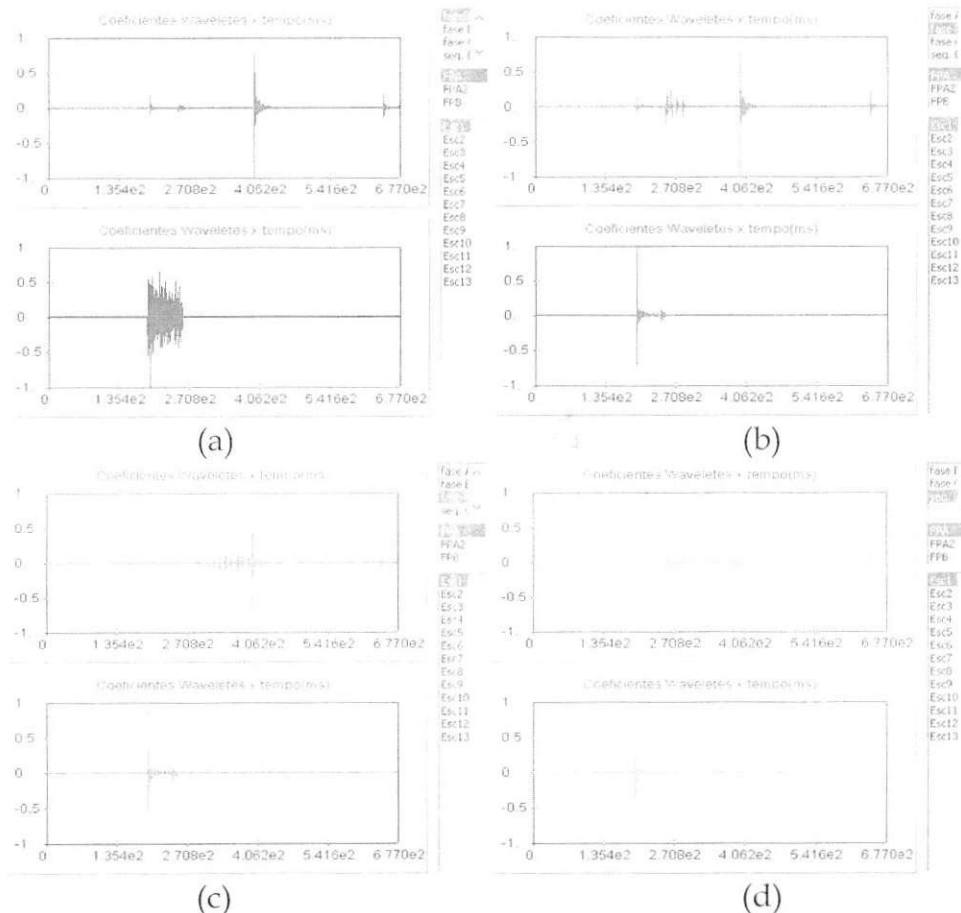


Figura 82 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando Ia, Ib e Ic (Figura 83) – algoritmo I: erro na detecção completa do intervalo.

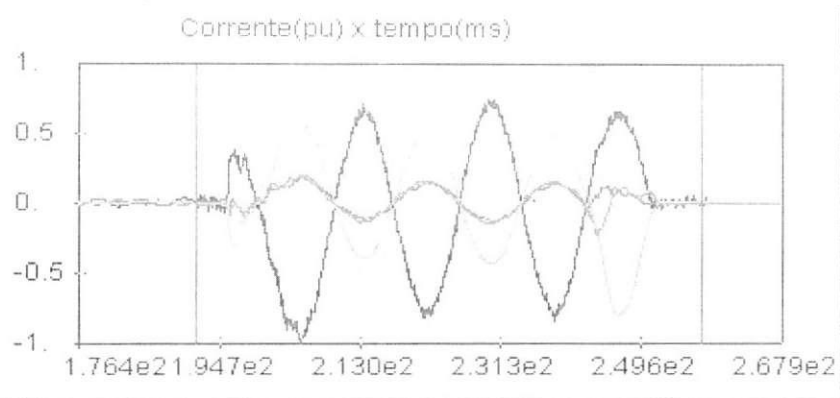


Figura 83 – Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ia (Figura 84): erro na detecção completa do intervalo.

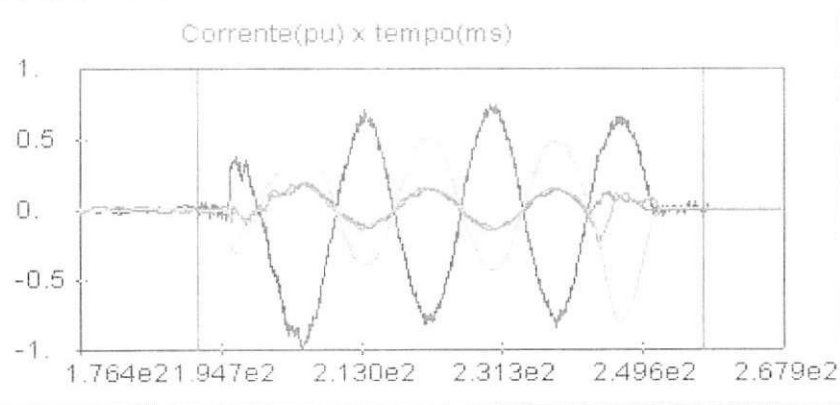


Figura 84 – Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ib (Figura 85): apenas o início da falta detectado corretamente.

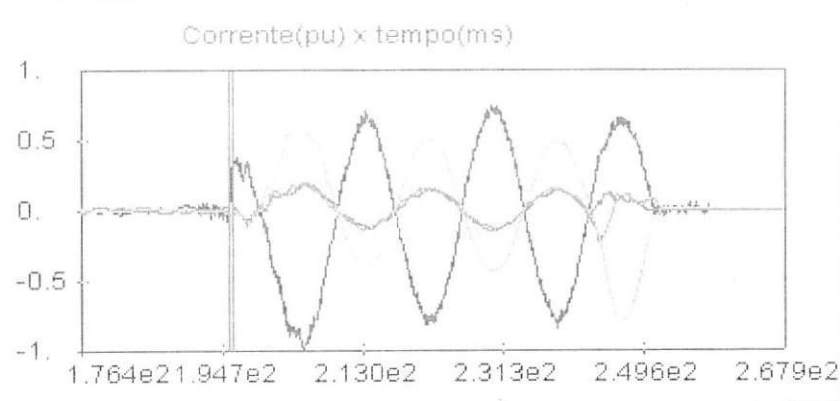


Figura 85 – Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 86): apenas o início da falta detectado corretamente.

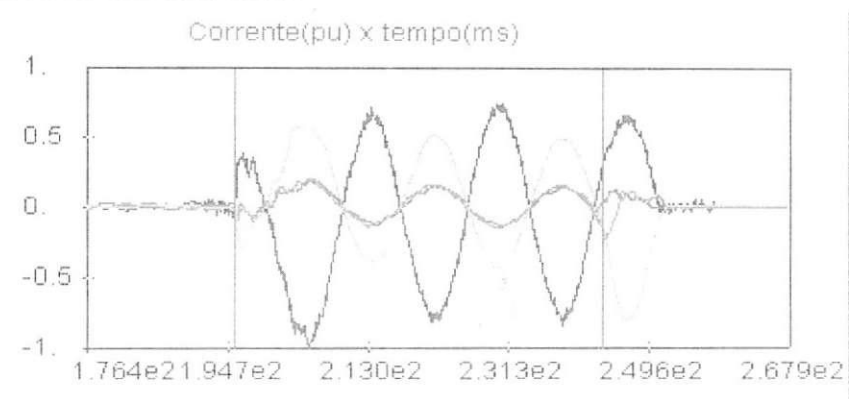


Figura 86 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 87): intervalo da falta detectado corretamente.

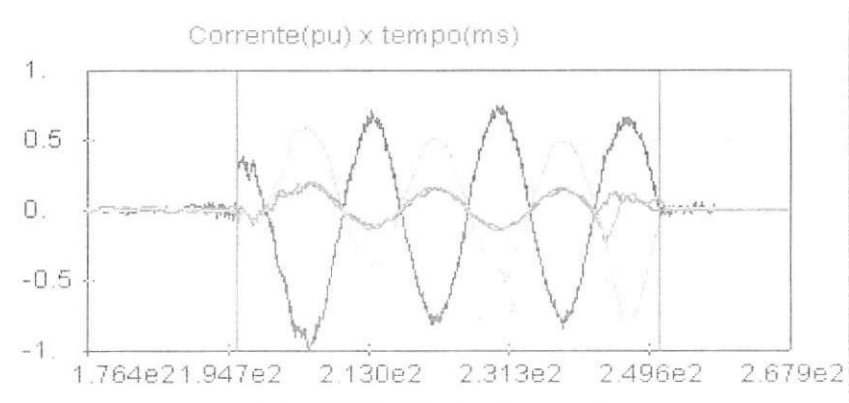


Figura 87 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 88): erro na detecção completa do intervalo.

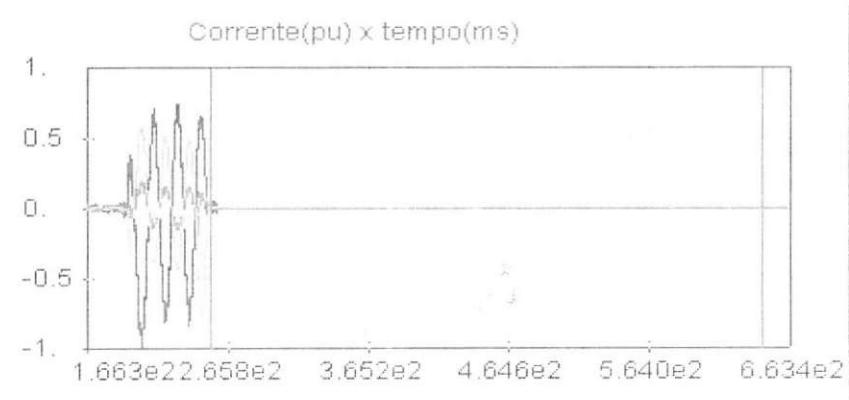


Figura 88 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

l) Registro11: 2004_07_22_16_47_28, falta BT

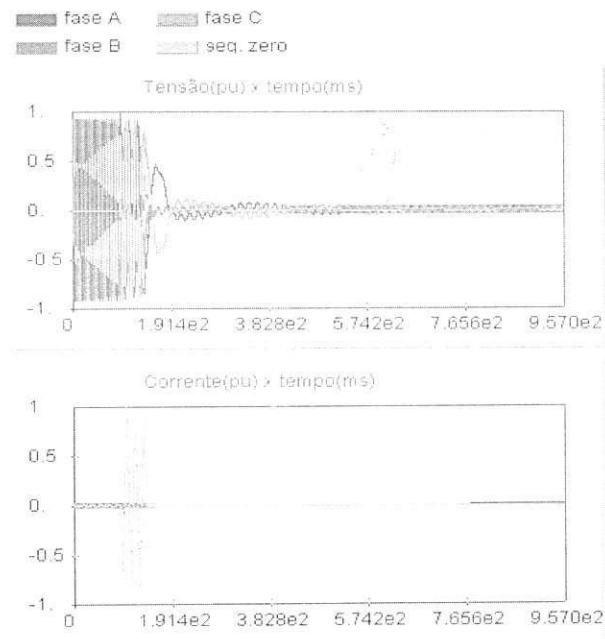


Figura 89 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

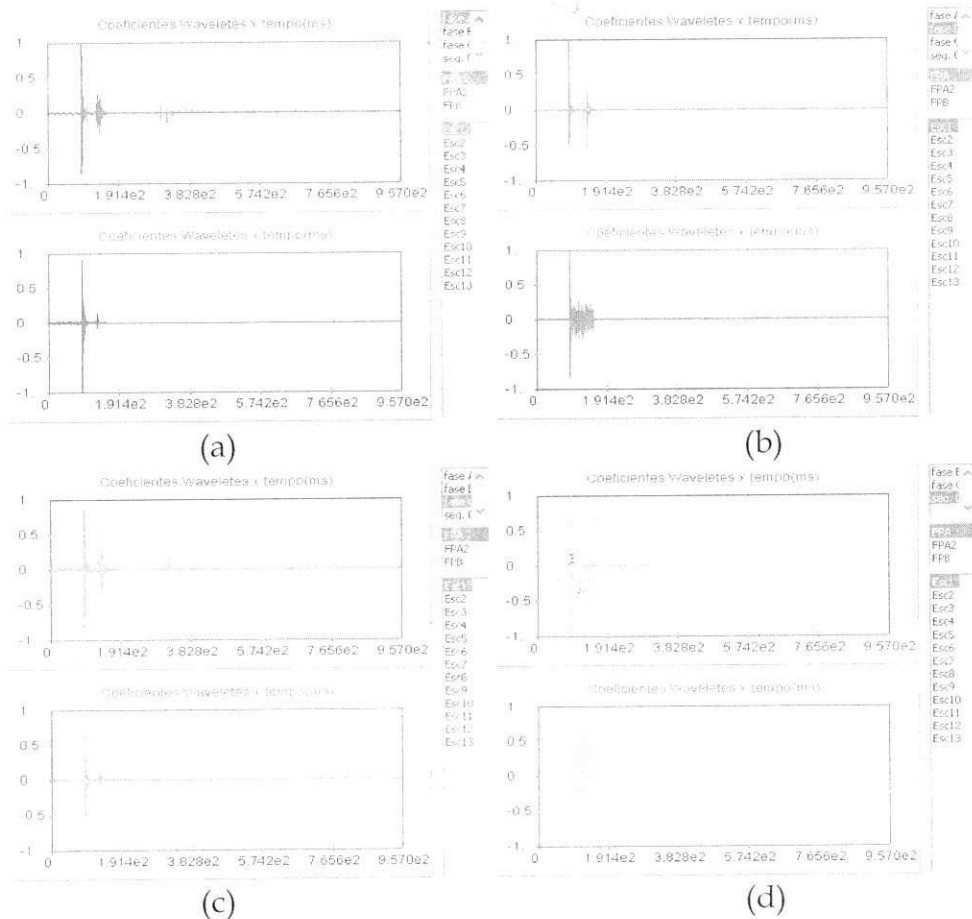


Figura 90 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando Ia, Ib e Ic (Figura 91) - algoritmo I: apenas o início da falta detectado corretamente.

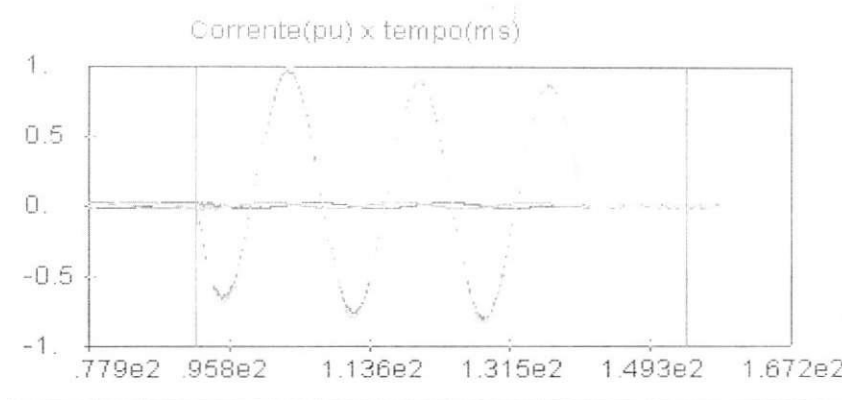


Figura 91 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ia (Figura 92): apenas o início da falta detectado corretamente.

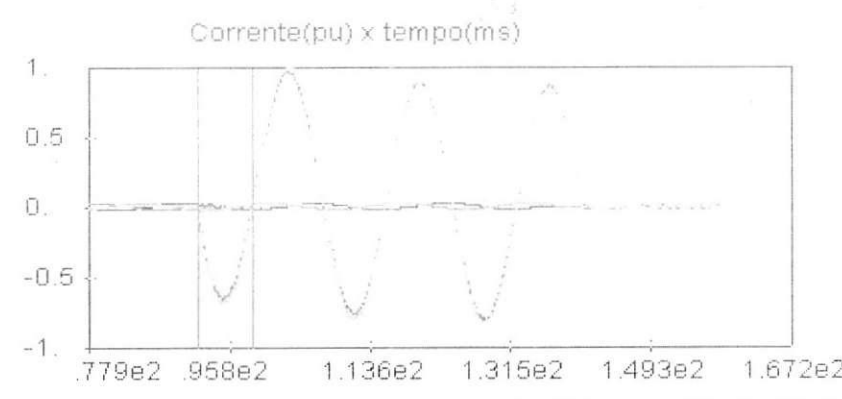


Figura 92 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ib (Figura 93): apenas o início da falta detectado corretamente.

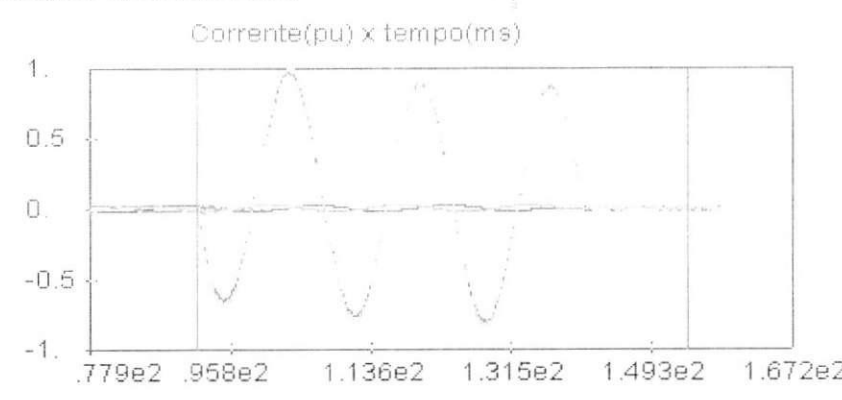


Figura 93 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 94): apenas o início da falta detectado corretamente.

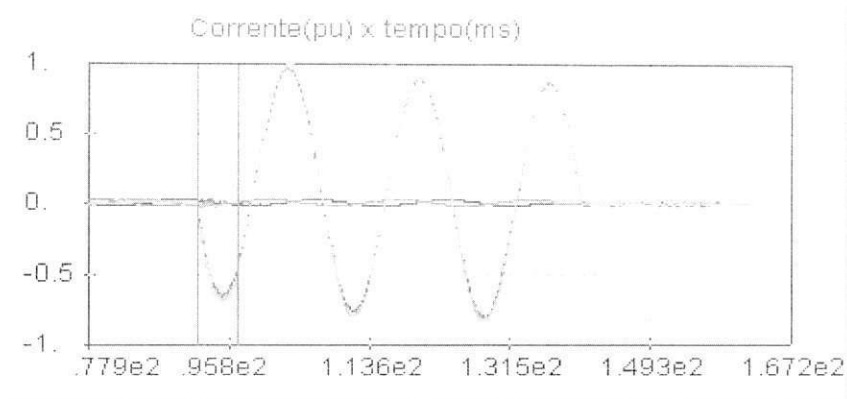


Figura 94 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 95): apenas o início da falta detectado corretamente.

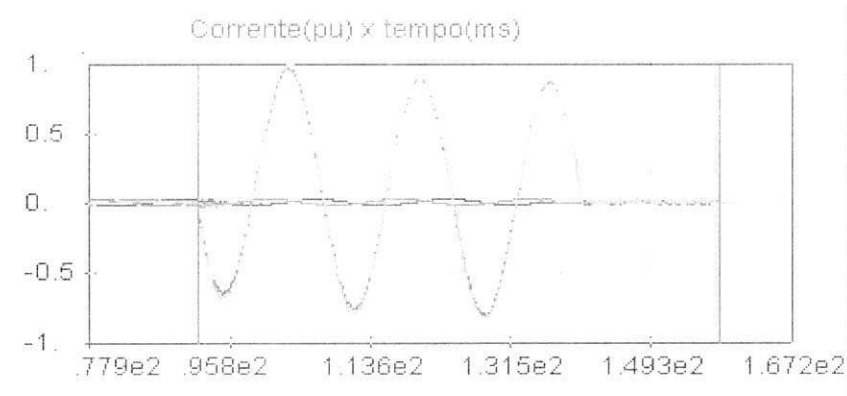


Figura 95 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 96): apenas o início da falta detectado corretamente.

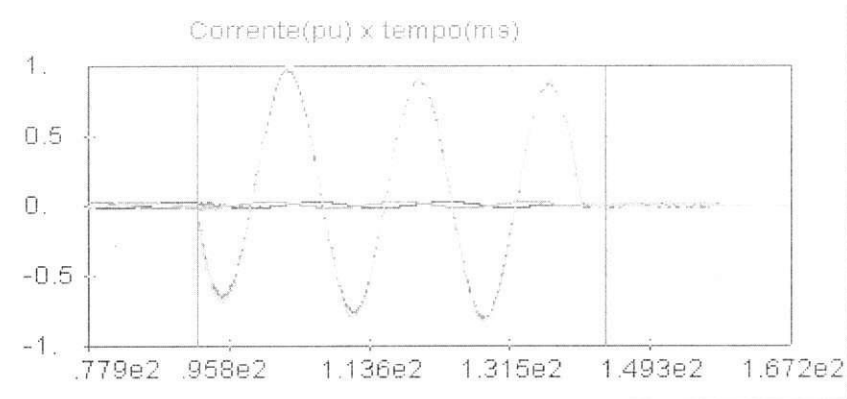


Figura 96 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

m) Registro12: 2004_07_02_11_02_02, falta BT

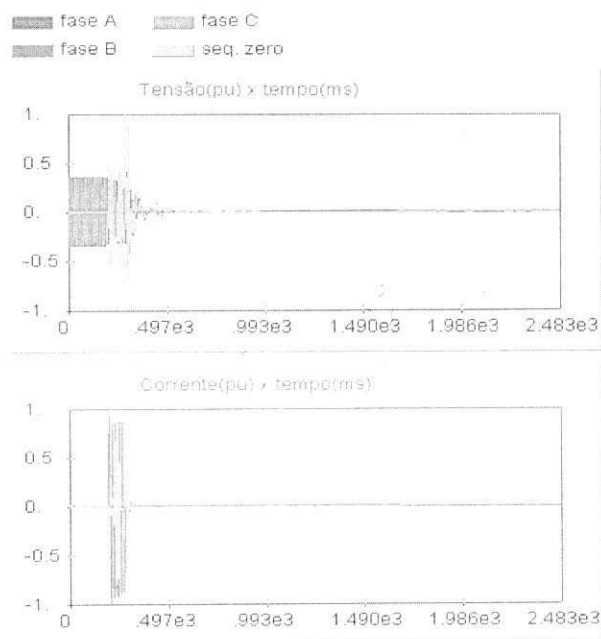


Figura 97 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

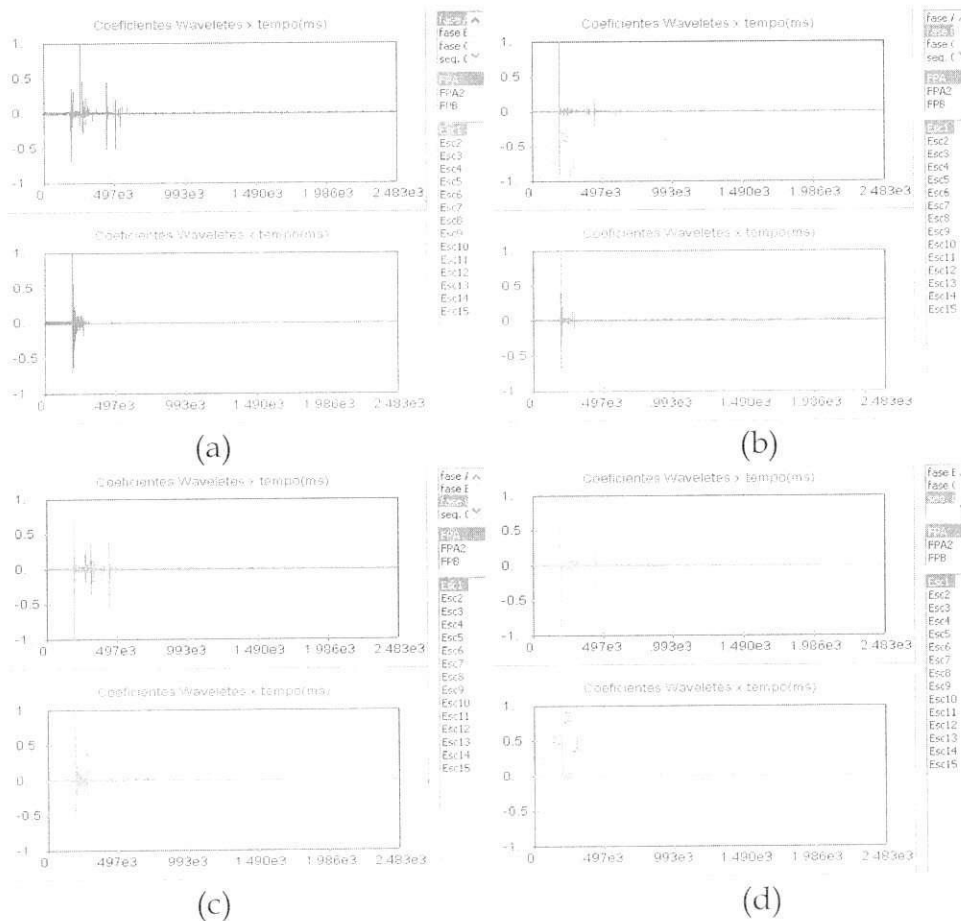


Figura 98 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando I_a , I_b e I_c (Figura 99) - algoritmo I: intervalo da falta detectado corretamente.

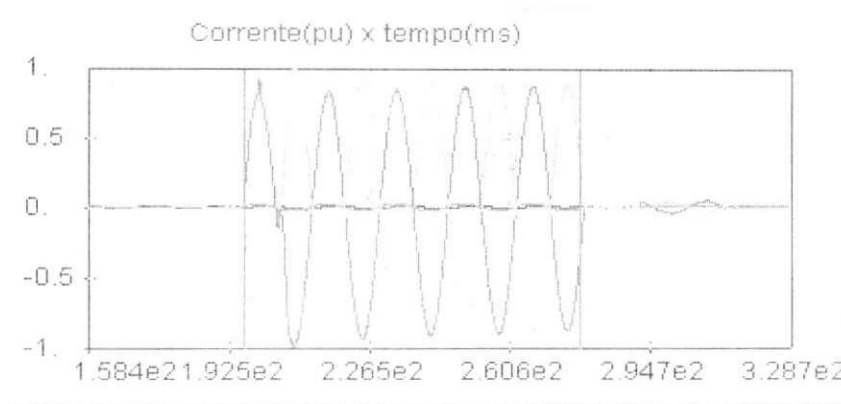


Figura 99 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_a (Figura 100): apenas o início da falta detectado corretamente.

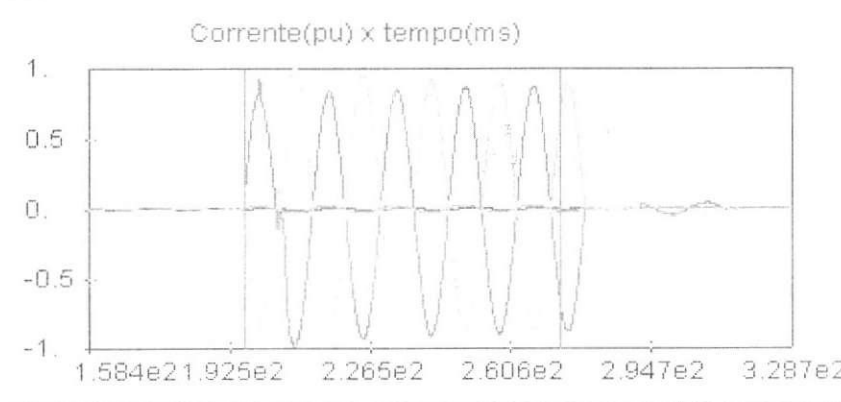


Figura 100 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_b (Figura 101): apenas o início da falta detectado corretamente.

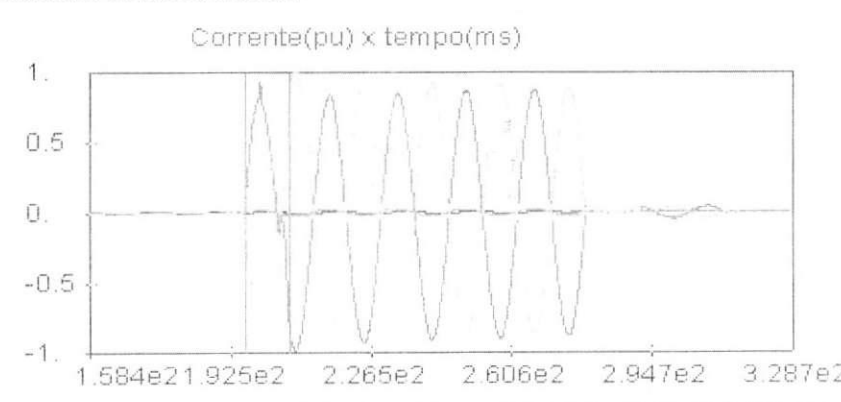


Figura 101 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 102): intervalo da falta detectado corretamente.

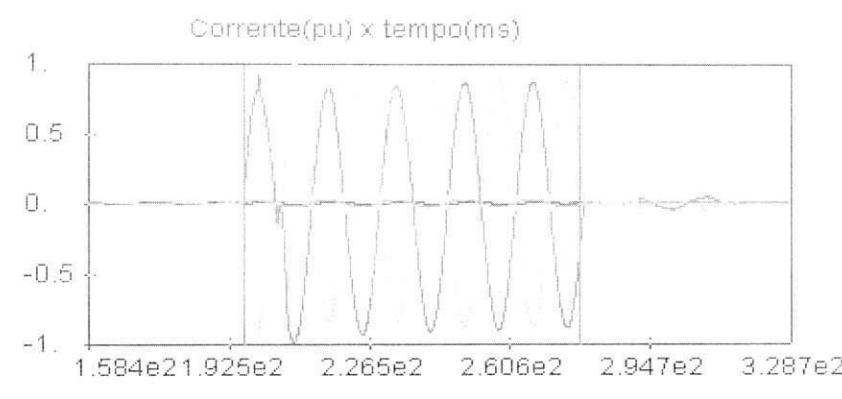


Figura 102 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 103): apenas o início da falta detectado corretamente.

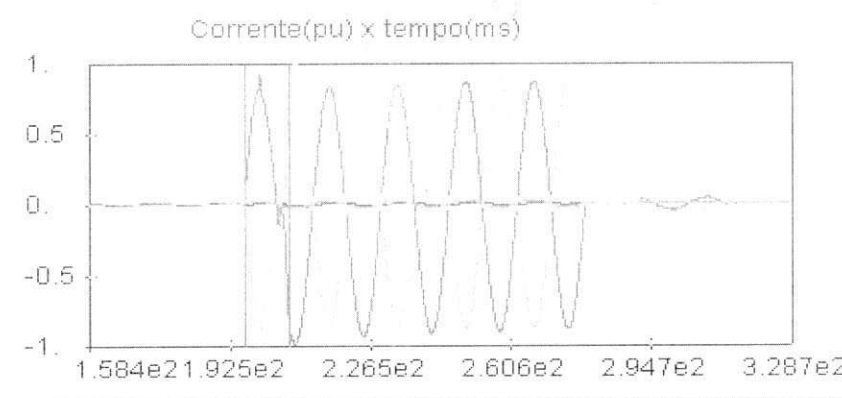


Figura 103 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 104): apenas o início da falta detectado corretamente.

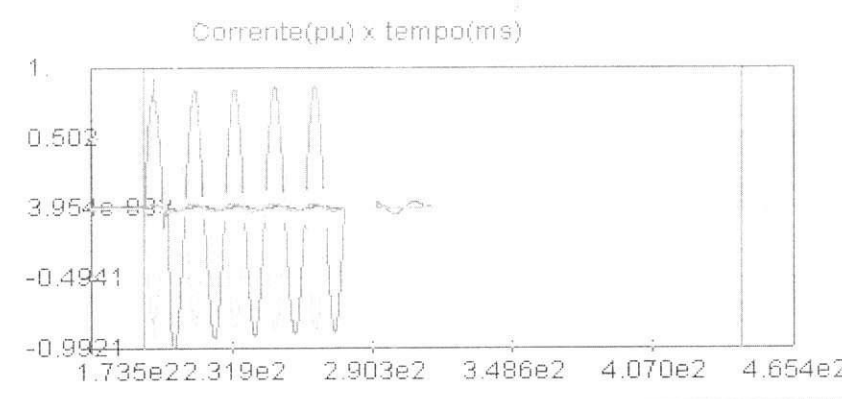


Figura 104 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

n) Registro13: 2004_04_26_16_30_41, falta ABT

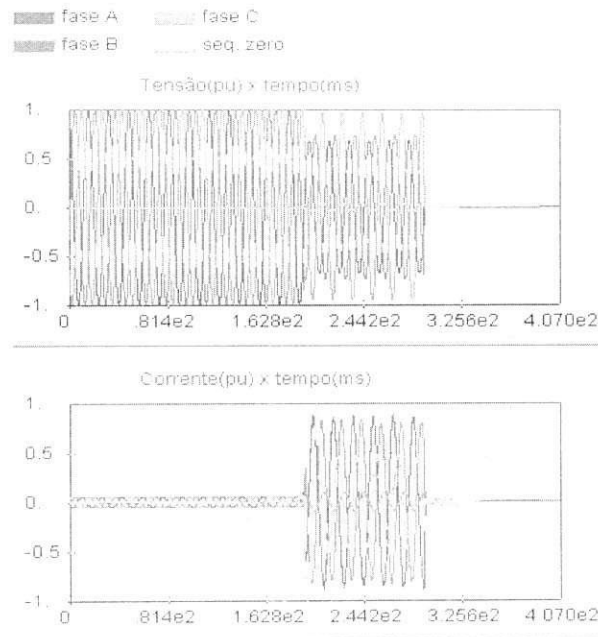


Figura 105 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

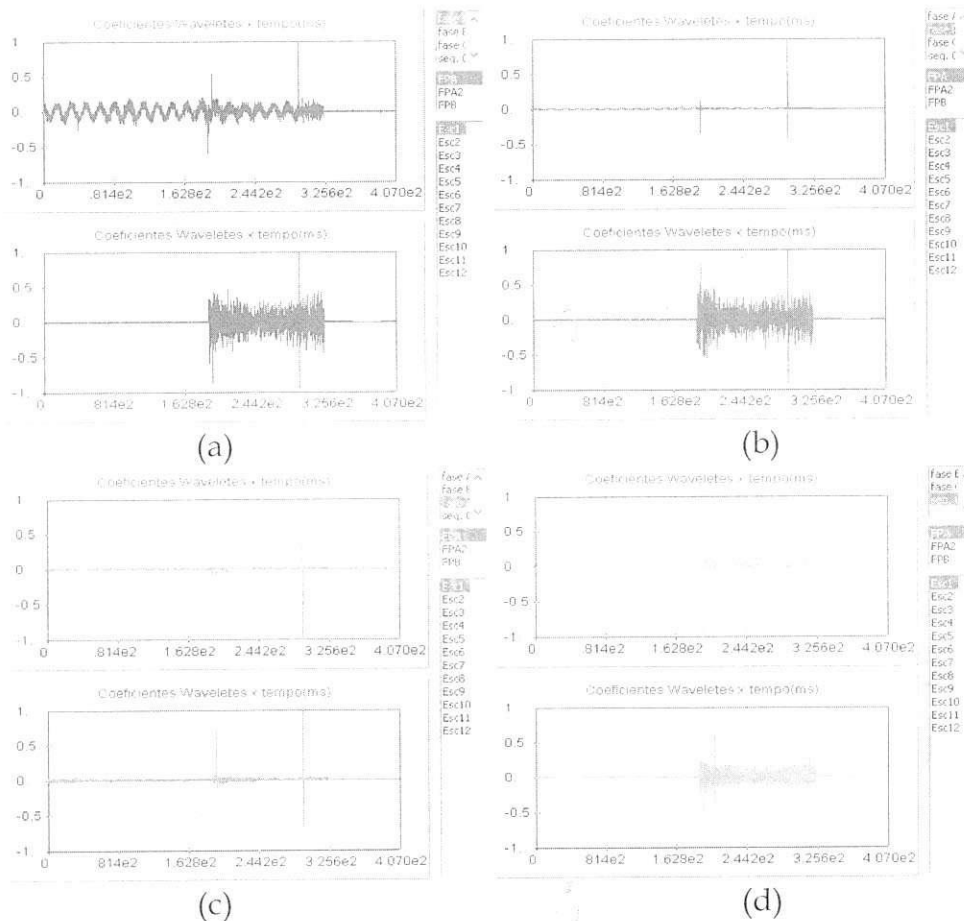


Figura 106 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando Ia, Ib e Ic (Figura 107) - algoritmo I: erro na detecção completa do intervalo.

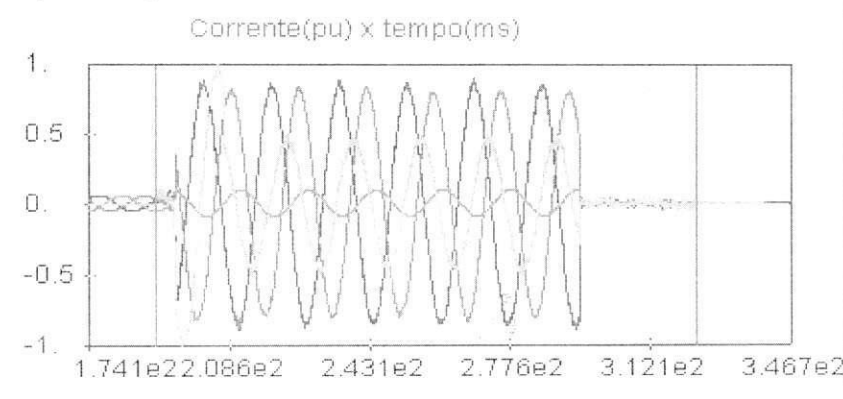


Figura 107 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ia (Figura 108): erro na detecção completa do intervalo.

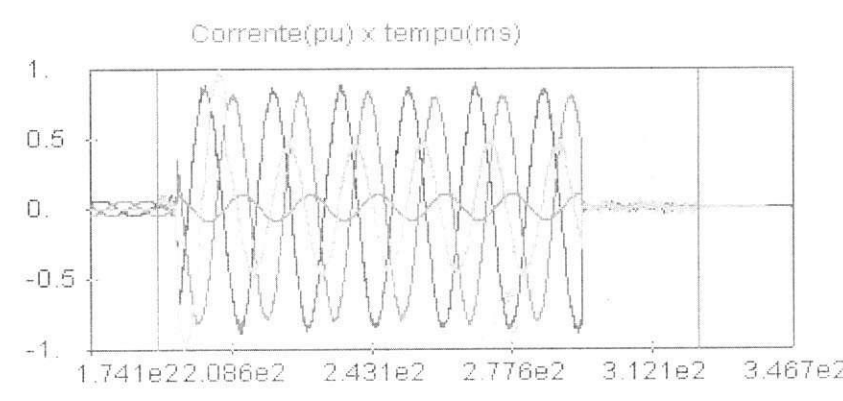


Figura 108 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ib (Figura 109): erro na detecção completa do intervalo.

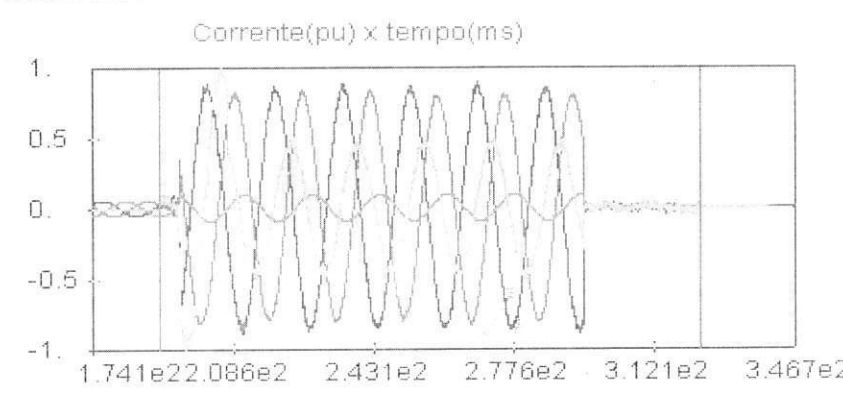


Figura 109 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 110): intervalo da falta detectado corretamente.

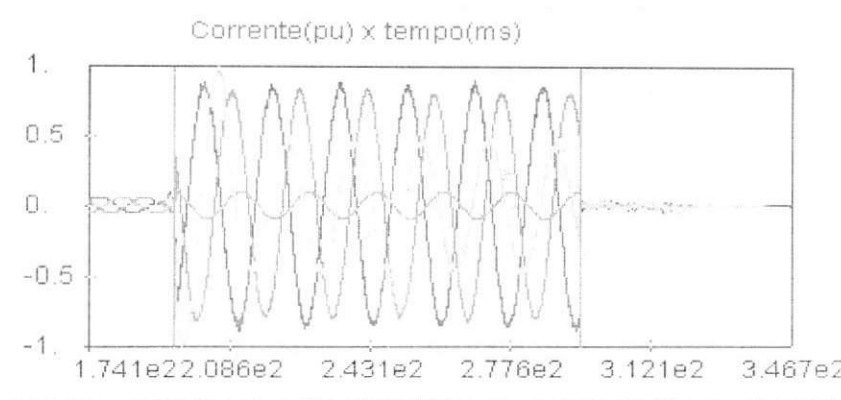


Figura 110 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 111): erro na detecção completa do intervalo.

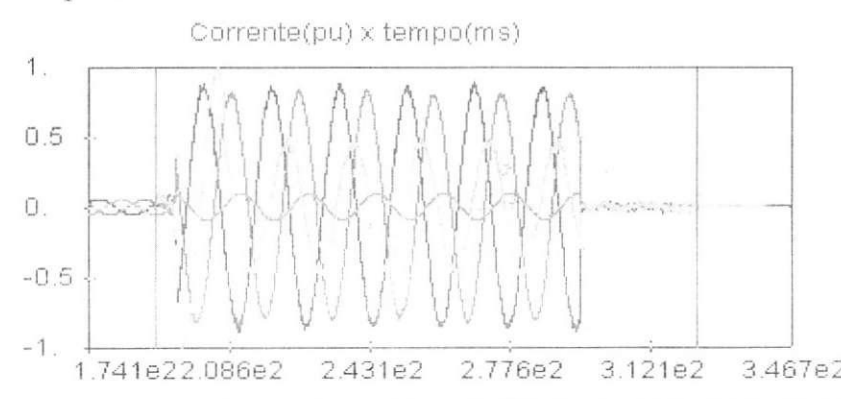


Figura 111 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 112): apenas o início da falta detectado corretamente.

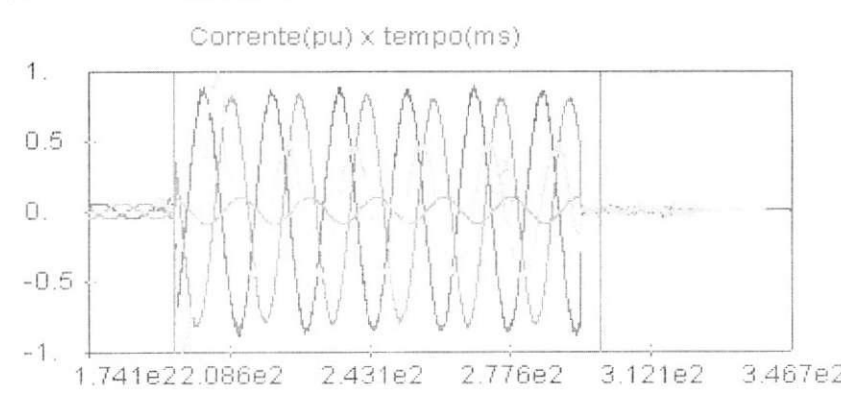


Figura 112 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

o) Registro14: 2003_08_30_09_25_25, Falta AB

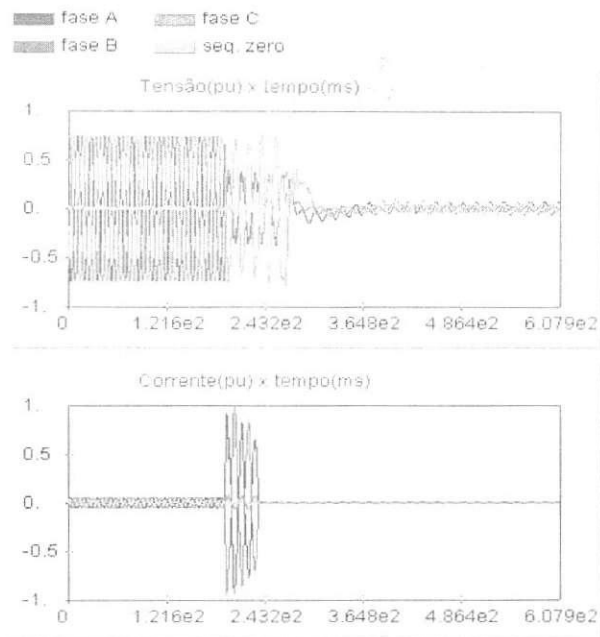


Figura 113 - Sinais de tensão e corrente no domínio do tempo.

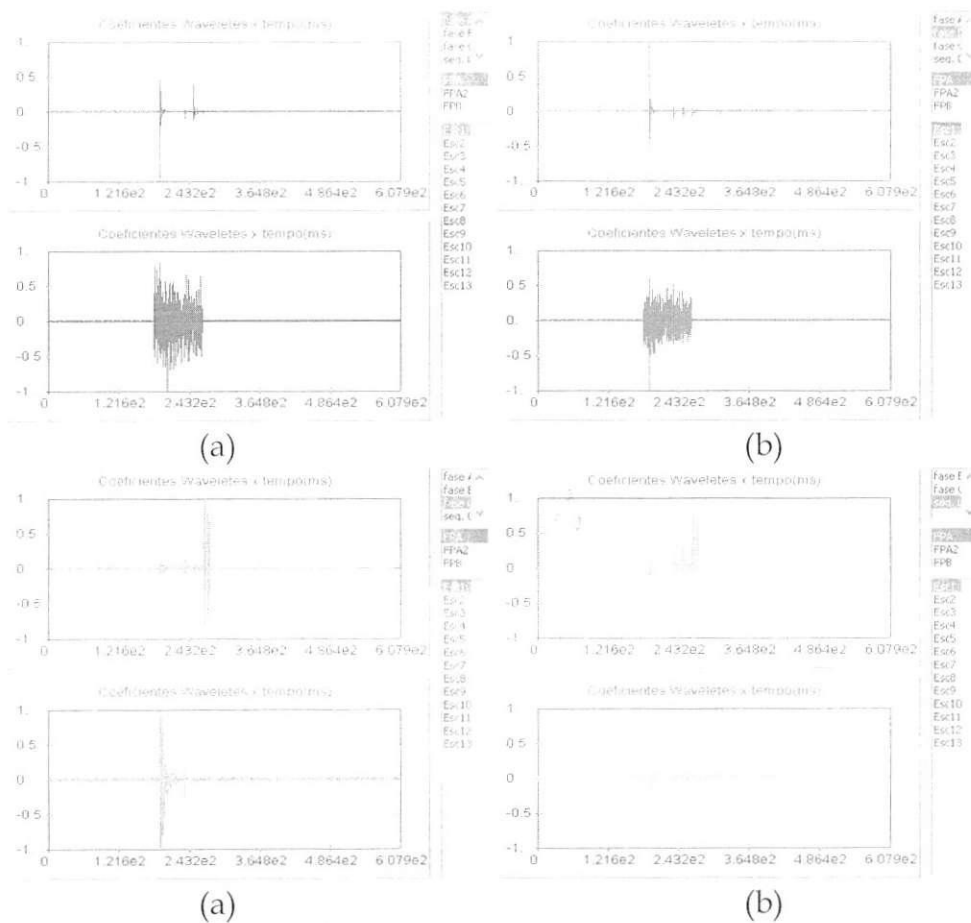


Figura 114 - Coeficientes wavelet das tensões e correntes.
 (a) Fase a. (b) Fase b. (c) Fase c. (d) Sequência zero.

- Considerando Ia, Ib e Ic (Figura 115) - algoritmo I: erro na detecção completa do intervalo.

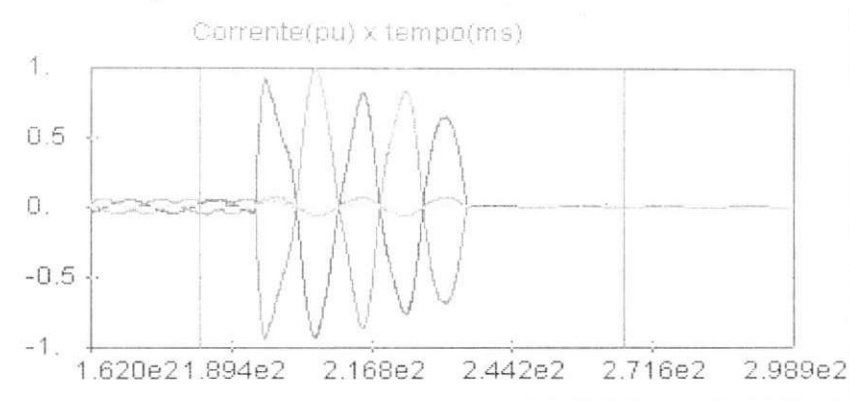


Figura 115 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ia (Figura 116): erro na detecção completa do intervalo.

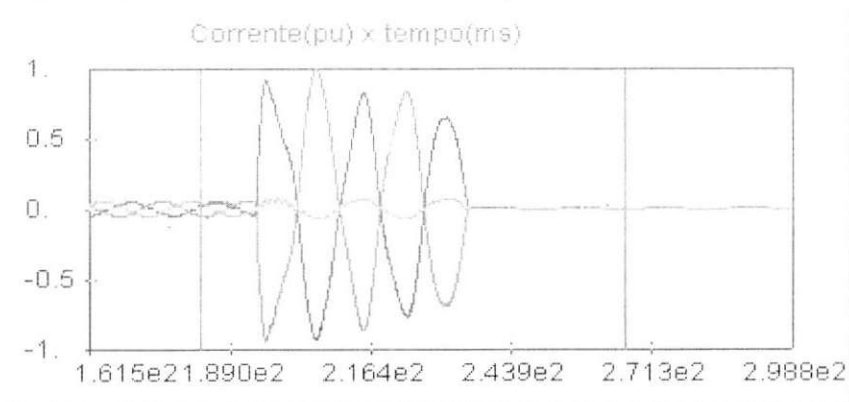


Figura 116 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas Ib (Figura 117): erro na detecção completa do intervalo.

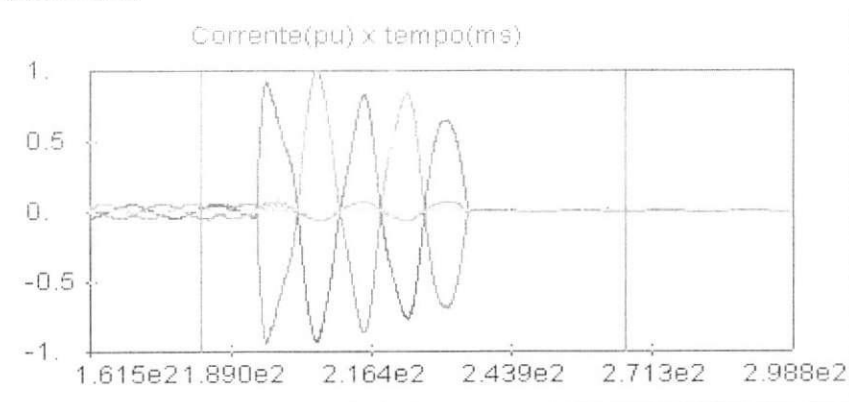


Figura 117 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_c (Figura 118): intervalo da falta detectado corretamente.

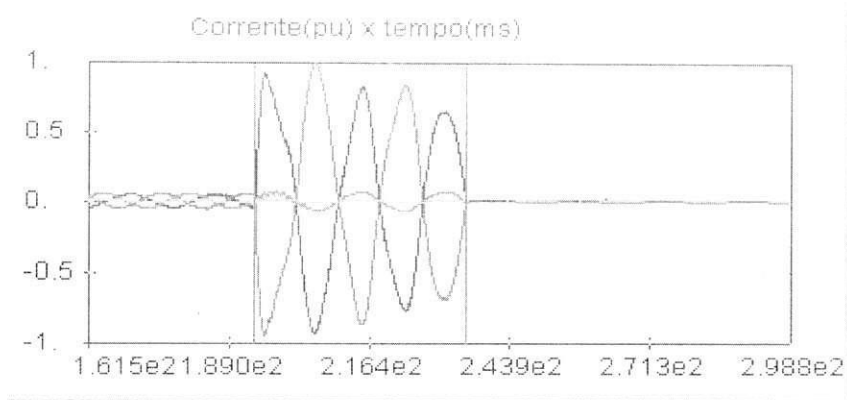


Figura 118 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas I_0 (Figura 119): apenas o início da falta detectado corretamente.

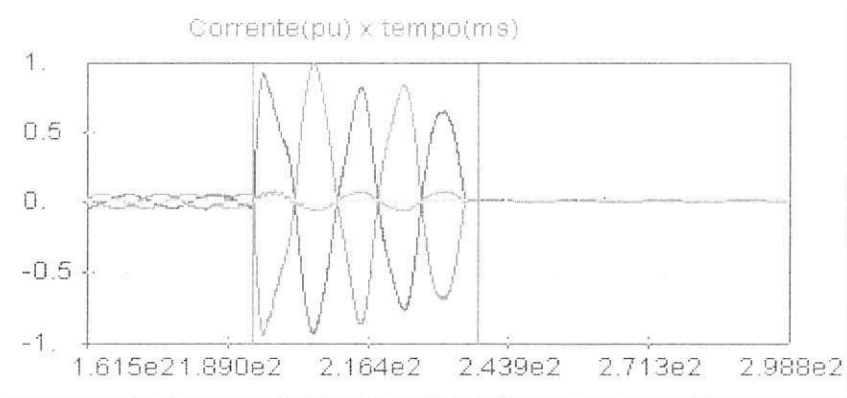


Figura 119 - Sinais de corrente no domínio do tempo.

- Considerando apenas V_0 (Figura 120): apenas o início da falta detectado corretamente.

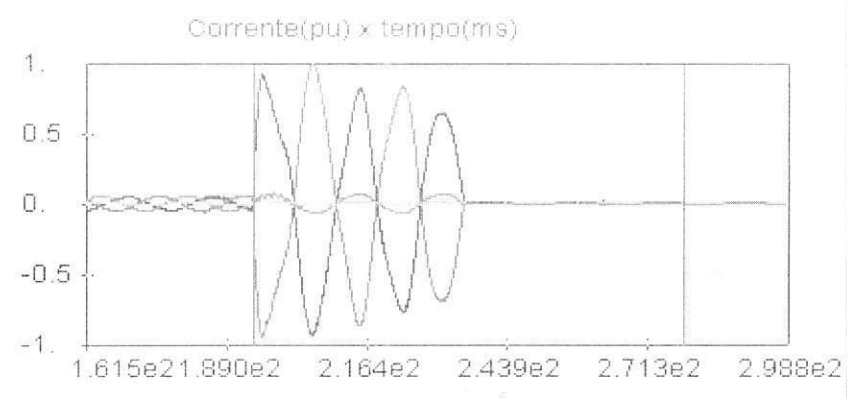


Figura 120 - Sinais de tensão no domínio do tempo.

Concluídas as etapas de implementações e simulações, deu-se início a etapa de análises dos registros e constatou-se a necessidade de aprimorar o algoritmo I. Elaborou-se então, o algoritmo apresentado a seguir.

Algoritmo II

1. Selecionar como sinais de entrada: Ia, Ib, Ic e I0.
2. Aplicar a TWD aos sinais no domínio do tempo, considerando-se apenas os coeficientes wavelets de primeira escala. Normalmente, esses coeficientes indicam a presença dos transitórios de alta frequência dos sinais.
3. Aplicar a técnica HWT aos coeficientes wavelet de todos os sinais avaliados. Normalmente, permanecem apenas os coeficientes wavelet relacionados aos distúrbios.
4. Avaliar os coeficientes wavelet de cada sinal para escolha dos instantes inicial e final. Para cada sinal, o primeiro coeficiente não nulo refere-se ao instante inicial e o último coeficiente não nulo refere-se ao instante final.
5. Esta etapa passa ser executada de acordo com as seguintes regras:
 - O instante inicial passa a ser definido como sendo o maior instante inicial dos sinais Ia, Ib, Ic e I0.
 - O instante final que ocorre após a atuação da proteção passa a ser definido, de início, como sendo o maior instante final dos sinais Ia, Ib e Ic.
 - Se o instante final de I0 for menor que o instante final, o instante final passa a ser o instante final de I0.

O desempenho do algoritmo II é apresentado na Tabela 1. Observou-se 100% de acerto na determinação do instante inicial da falta para todos os registros analisados. Em relação ao instante final, o desempenho melhorou, mas o algoritmo ainda erra bastante.

Desenvolveu-se então um novo algoritmo (algoritmo III), o qual trata de forma distinta as correntes de fase e a corrente de seqüência zero para a detecção do instante final. Isto é feito estabelecendo um limiar de *threshold* diferente para os sinais. Para isso, o algoritmo III tem rotinas especializadas para verificar se o limiar de *threshold* é válido e para reajustá-lo. Outra inovação é a análise dos coeficientes wavelet das correntes na escala 4.

A elaboração do algoritmo III foi feita visando aproveitar ao máximo as qualidades do algoritmo II. Neste sentido, manteve-se o procedimento de detecção do início da falta utilizado no algoritmo II, ou seja, para detectar o início de uma falta considerou-se apenas a avaliação dos coeficientes wavelet dos sinais de corrente da primeira escala.

Os estudos realizados mostraram que mesmo após o *threshold*, as componentes wavelet relacionadas com o transitório após o instante final da falta não são eliminadas completamente. Por isso, o instante final não era detectado corretamente. Observou-se também que os coeficientes wavelet da quarta escala são bastante adequados para identificar o instante final da falta, desde que os limiares de *threshold* estejam devidamente ajustados.

Apresenta-se a seguir o algoritmo III.

Algoritmo III

1. Selecionar como sinais de entrada: Ia, Ib, Ic e I0.
2. Aplicar a TWD aos sinais no domínio do tempo. Serão considerados os coeficientes wavelet da primeira e da quarta escala.
3. Aplicar a técnica HWT aos coeficientes wavelet da primeira escala de todos os sinais avaliados.
4. Avaliar os coeficientes wavelet da primeira escala de cada sinal para escolha do instante inicial. Para cada sinal, o primeiro coeficiente não nulo refere-se ao instante inicial. O maior instante inicial dos sinais Ia, Ib, Ic e I0 será o instante inicial procurado.
5. Aplicar a técnica HWT aos coeficientes wavelet da quarta escala de todos os sinais avaliados.
6. Avaliar, para cada sinal, se o limiar de *threshold* satisfaz a condição de que o instante inicial encontrado na quarta escala é próximo, no máximo 3 amostras, ao instante inicial na primeira escala. Se o instante inicial de determinado sinal na quarta escala for muito menor que o instante inicial na primeira escala, então o limiar de *threshold* é incrementado em 0,01 e o passo 6 é repetido.
7. Avaliar os coeficientes wavelet da quarta escala de cada sinal para escolha do instante final.
8. O instante final é definido como sendo o menor instante final dos sinais Ia, Ib, Ic e I0.

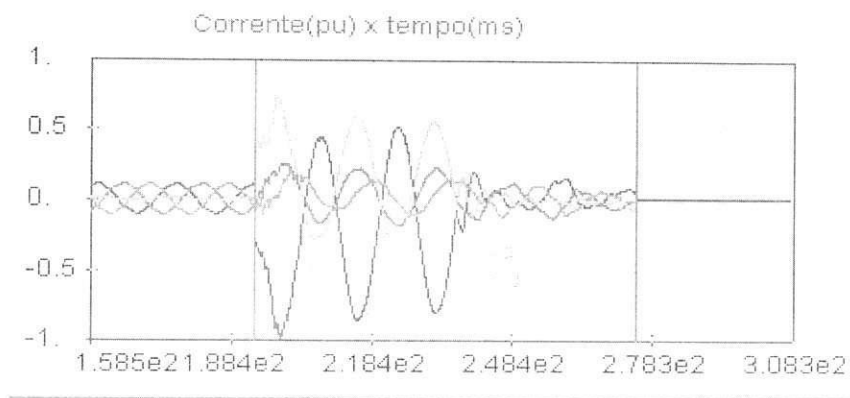
Apresenta-se na Tabela 1 um resumo do desempenho dos três algoritmos para os sinais apresentados anteriormente. Constata-se a superioridade absoluta do algoritmo III em relação aos outros algoritmos.

Os resultados apresentados neste relatório constituem-se numa amostra do conjunto de 121 registros. Para todos os 121 registros analisados, o algoritmo III apresentou 100% de acerto.

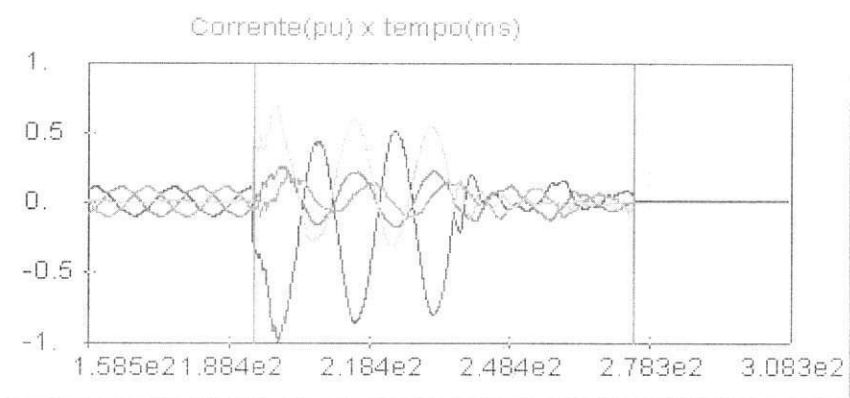
A comparação gráfica dos três algoritmos é apresentada nas figuras a seguir.

Tabela 1. Avaliação do desempenho dos três algoritmos.

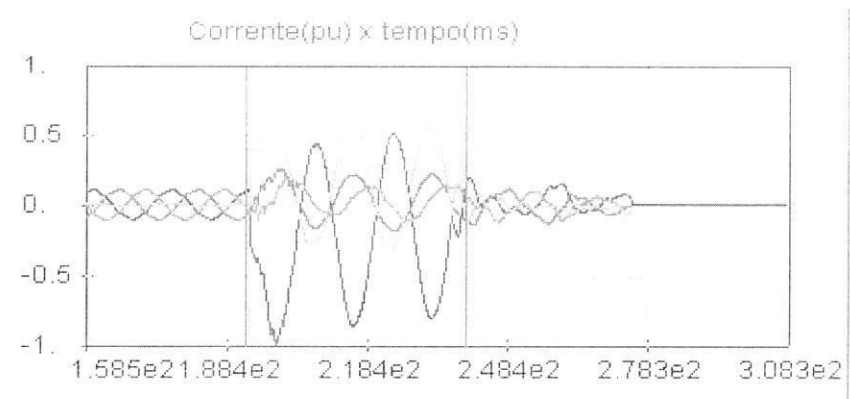
Registro analisado	Tipo de falta	Detecção correta do início da falta			Detecção correta do final da falta		
		Algoritmo			Algoritmo		
		I	II	III	I	II	III
Registro 1	AT	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Registro 2	CT	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Registro 3	CT	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Registro 4	CT	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Registro 5	AB	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Registro 6	CT	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Registro 7	BT	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Registro 8	BT	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Registro 9	AB	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Registro 10	ACT	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Registro 11	BT	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Registro 12	BT	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Registro 13	ABT	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Registro 14	AB	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim



(a)

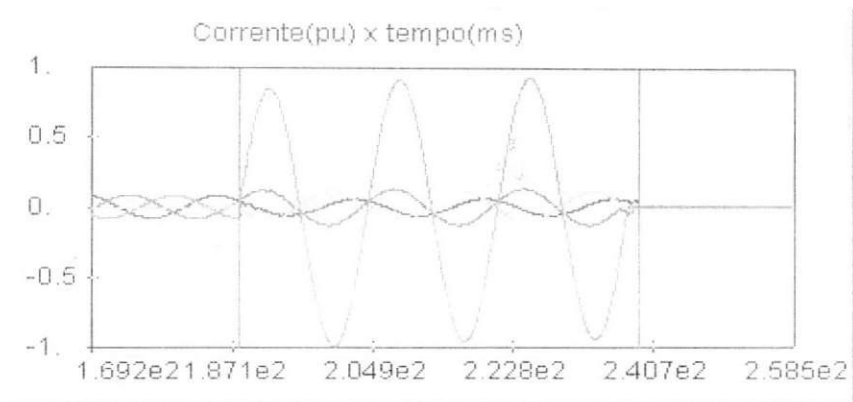


(b)

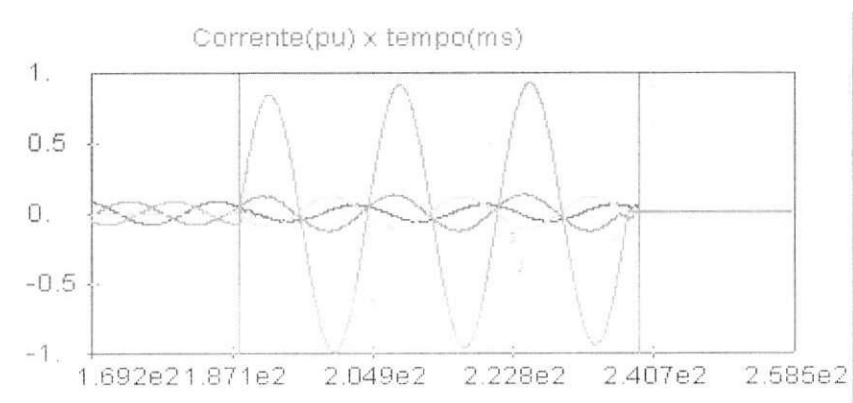


(c)

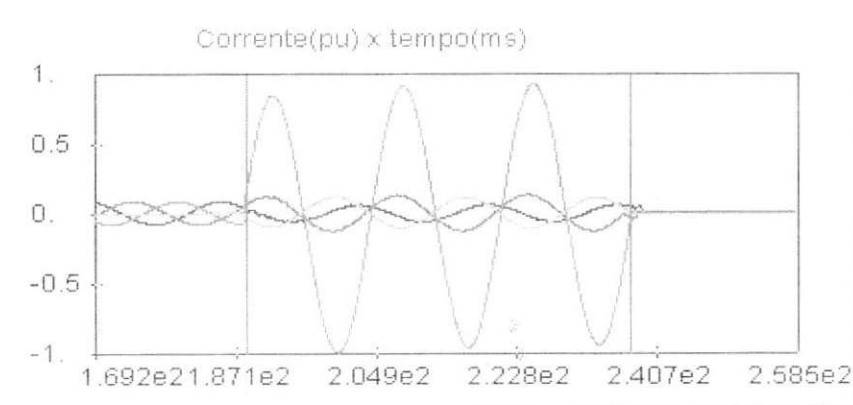
Figura 121 - Delimitação do intervalo de falta para o registro 1 usando:
(a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)

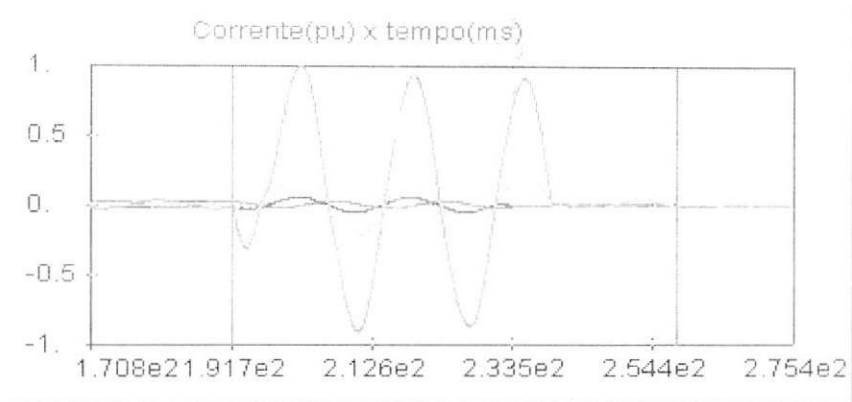


(b)

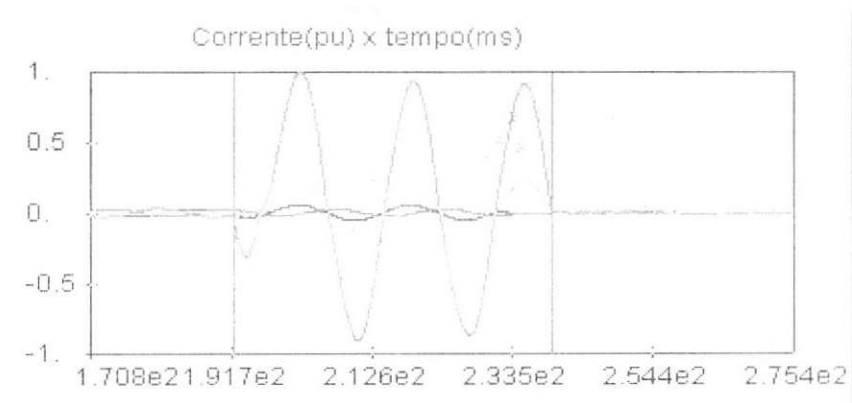


(c)

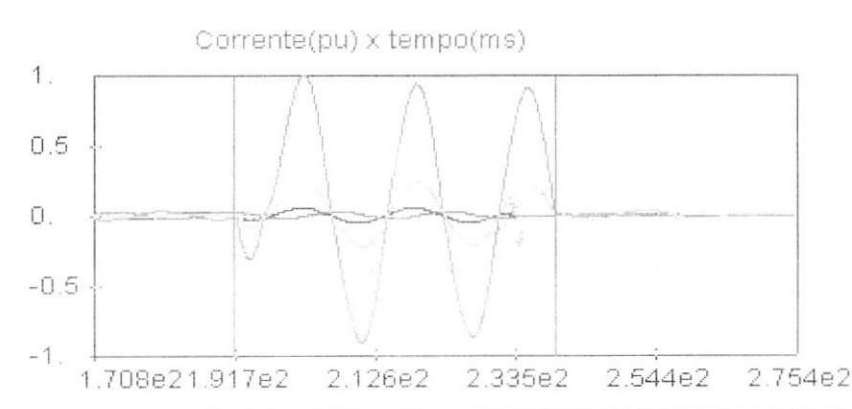
Figura 122 - Delimitação do intervalo de falta para o registro 2 usando:
 (a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)



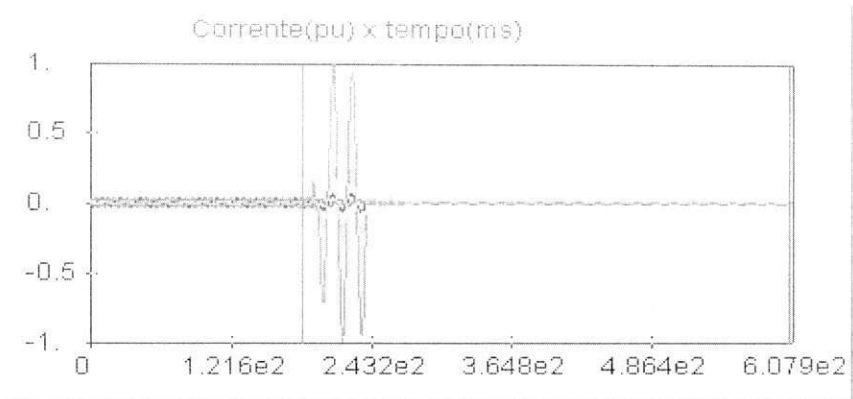
(b)



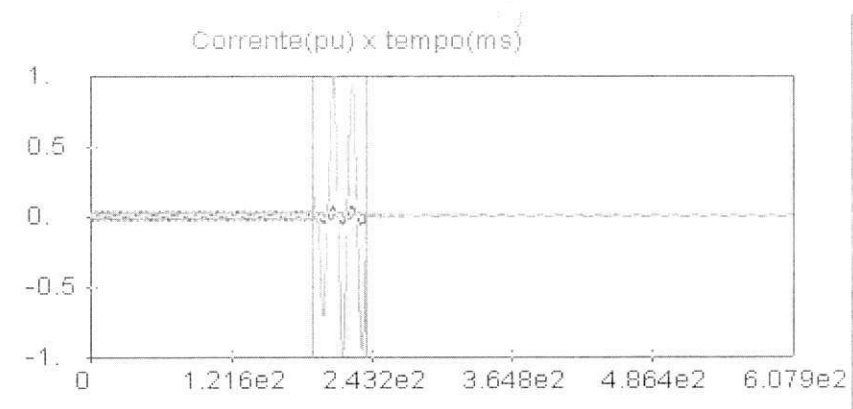
(c)

Figura 123 – Delimitação do intervalo de falta para o registro 3 usando:

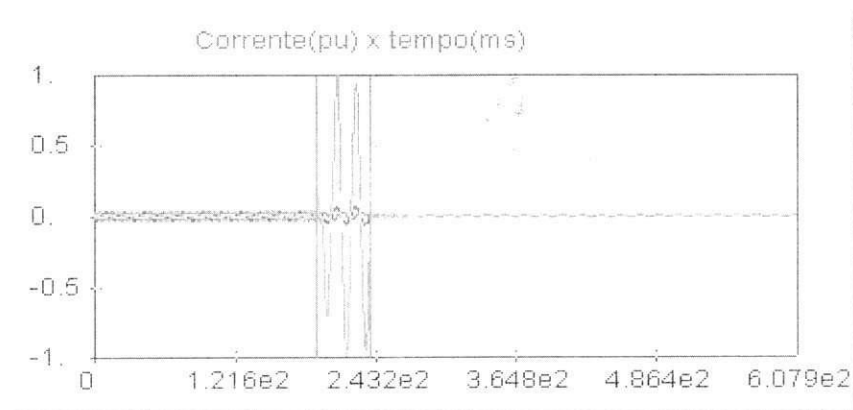
(a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)

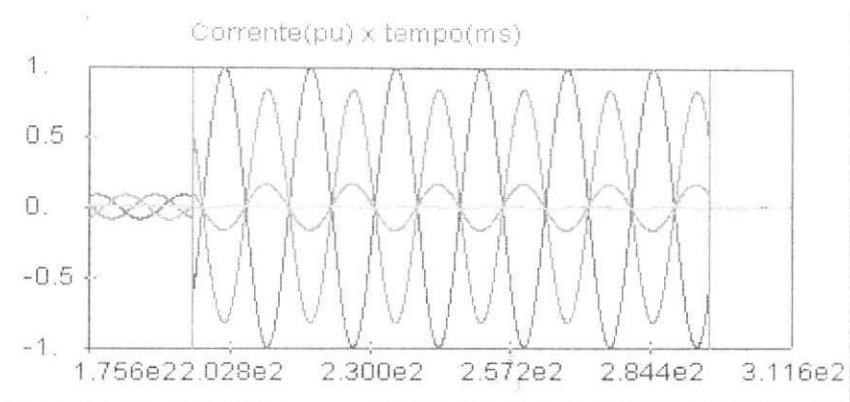


(b)

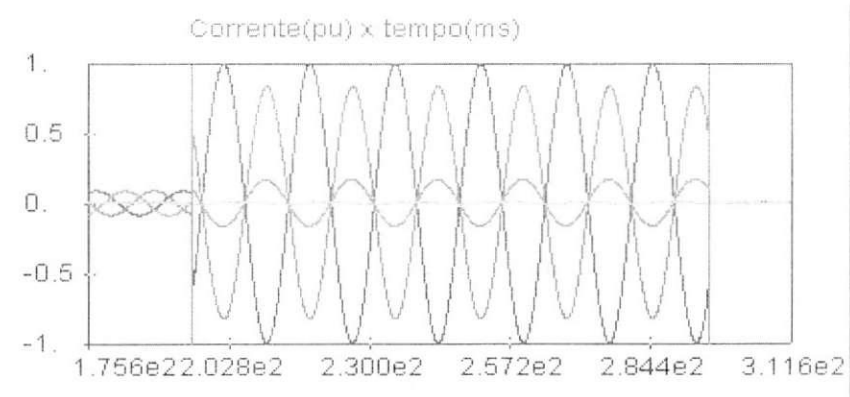


(c)

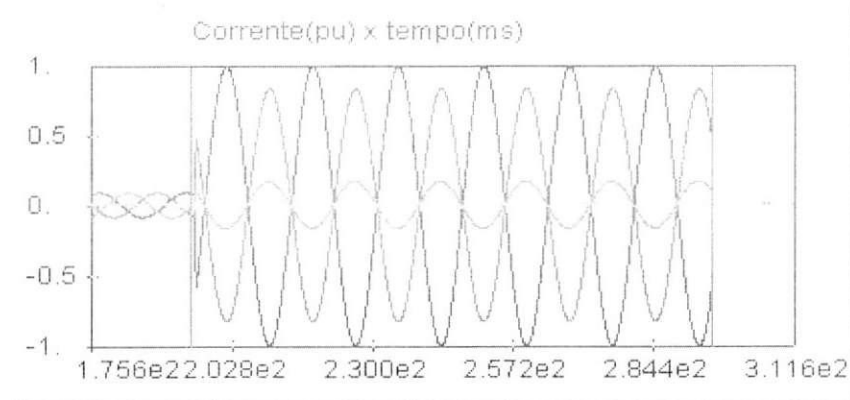
Figura 124 – Delimitação do intervalo de falta para o registro 4 usando:
 (a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)

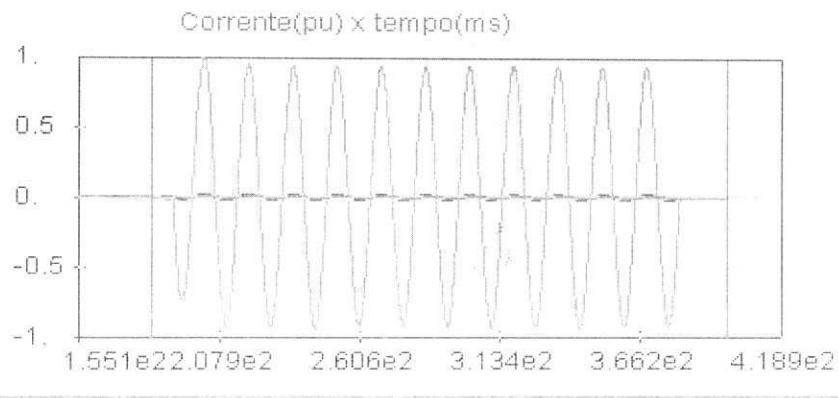


(b)

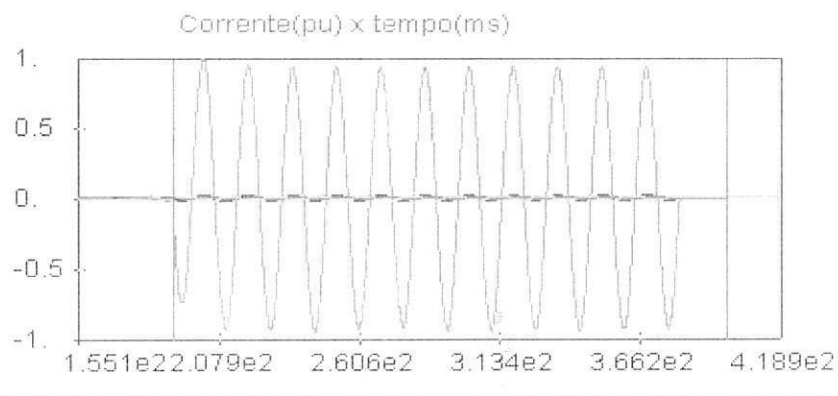


(c)

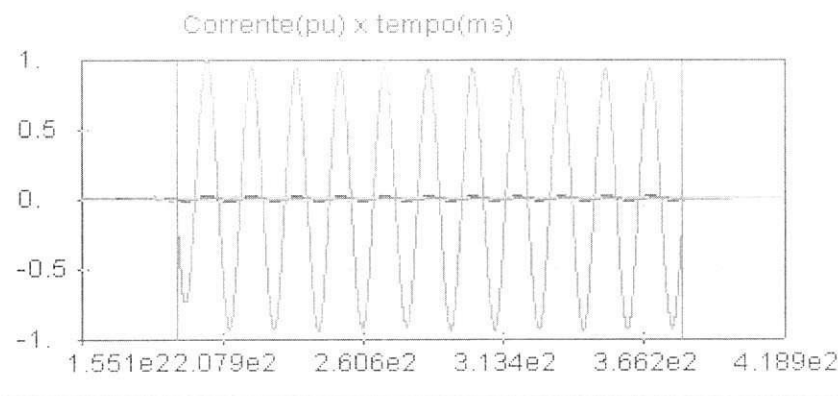
Figura 125 – Delimitação do intervalo de falta para o registro 5 usando:
 (a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)



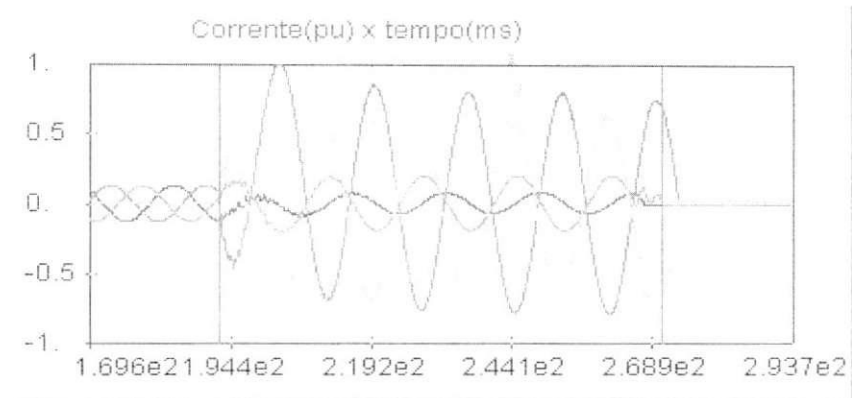
(b)



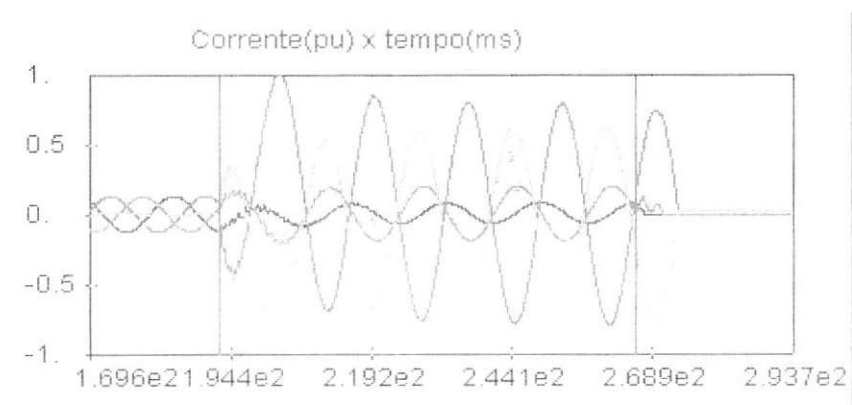
(c)

Figura 126 - Delimitação do intervalo de falta para o registro 6 usando:

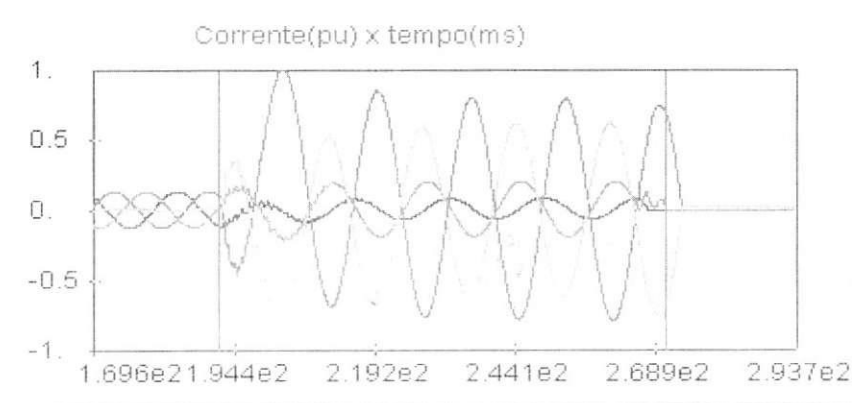
(a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)

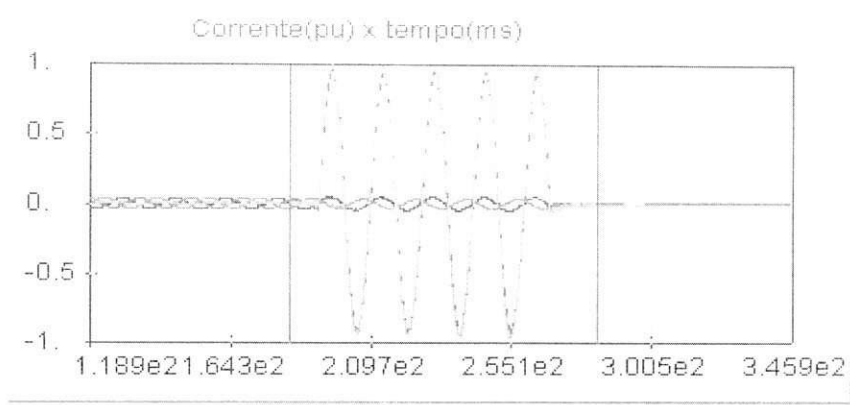


(b)

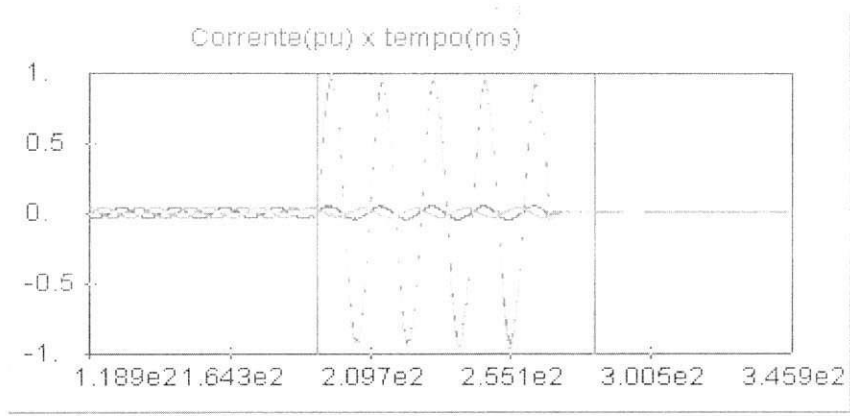


(c)

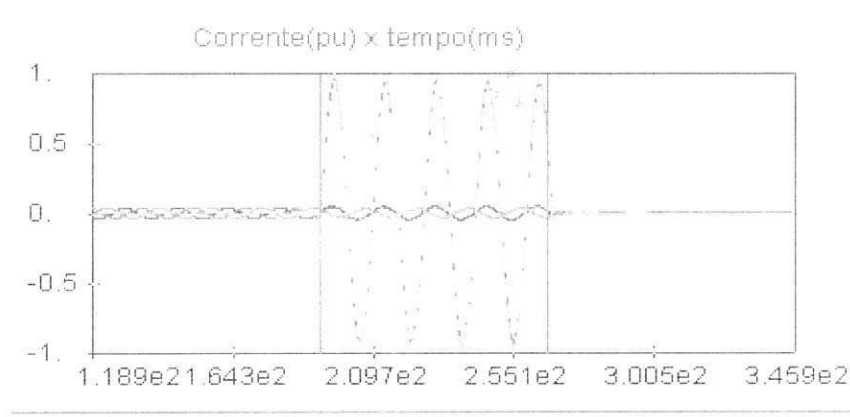
Figura 127 - Delimitação do intervalo de falta para o registro 7 usando:
 (a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)

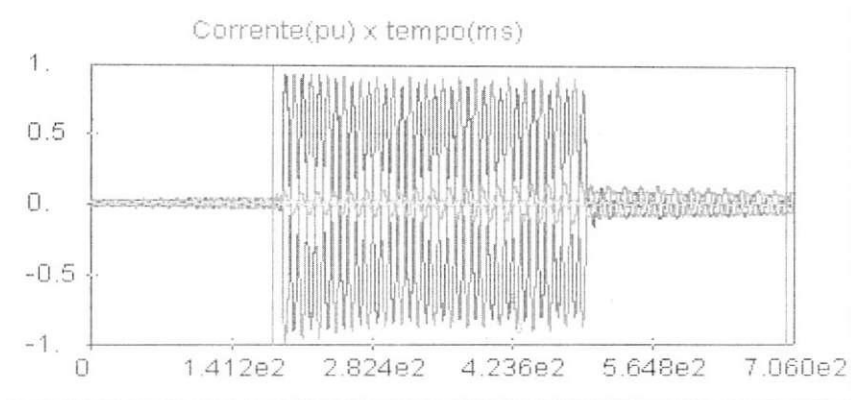


(b)

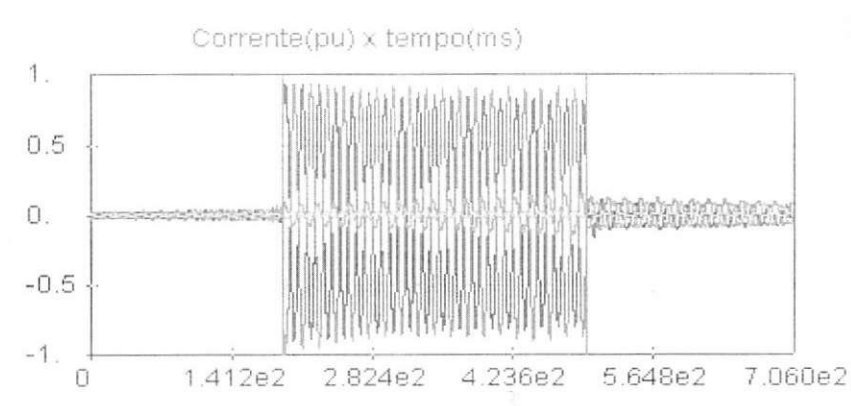


(c)

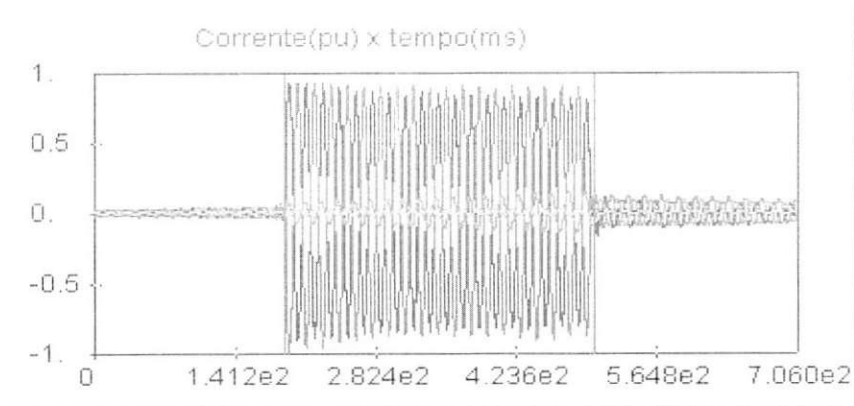
Figura 128 – Delimitação do intervalo de falta para o registro 8 usando:
 (a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)

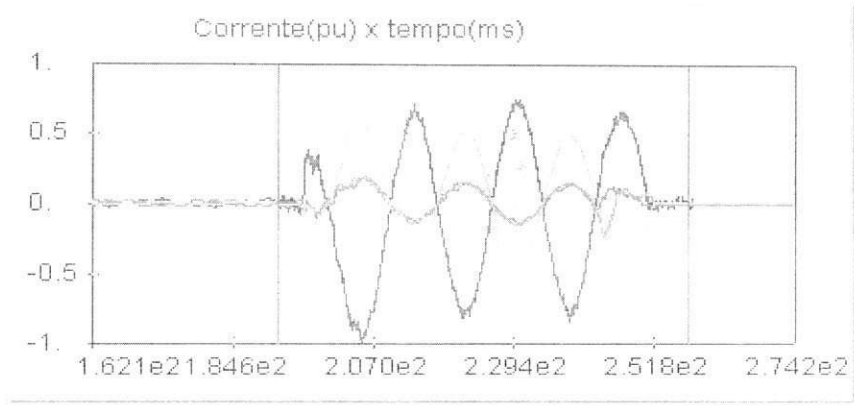


(b)

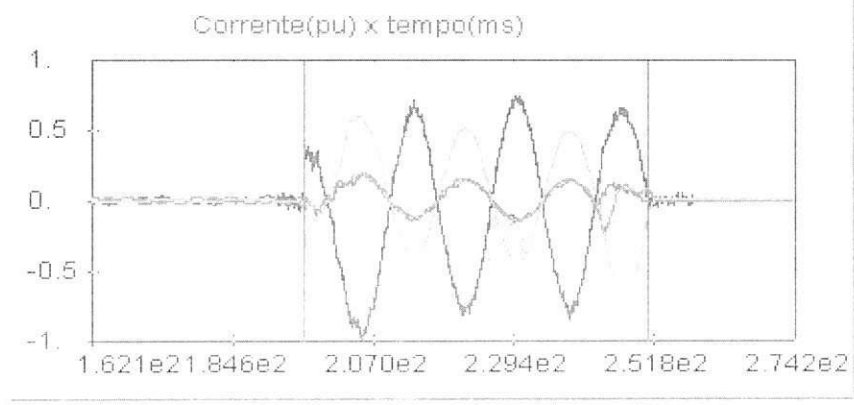


(c)

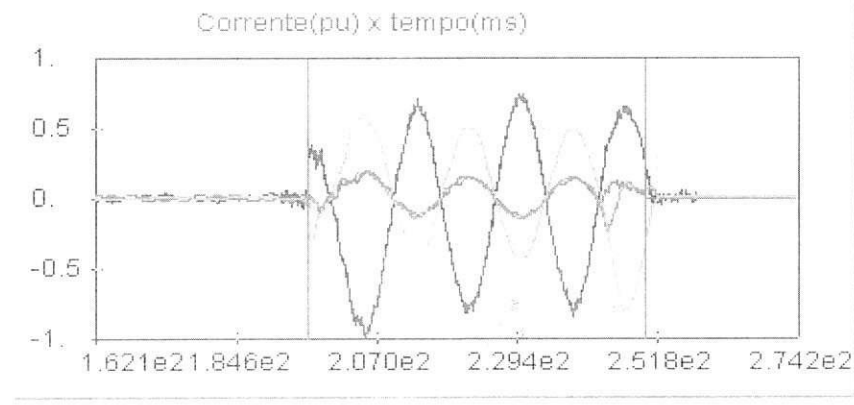
Figura 129 - Delimitação do intervalo de falta para o registro 9 usando:
 (a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)

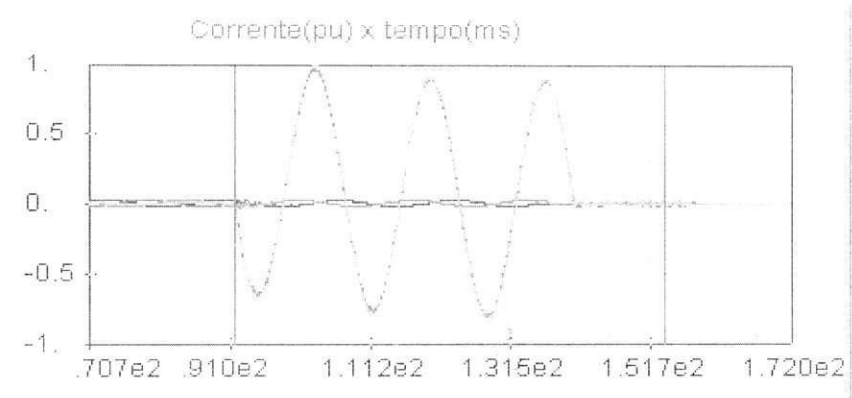


(b)

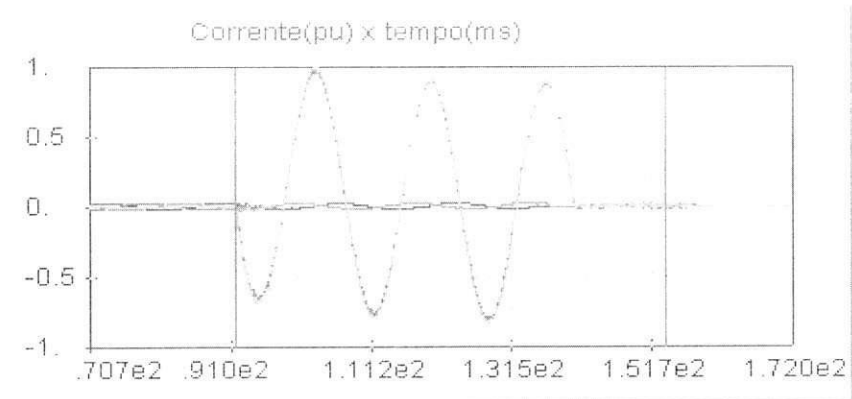


(c)

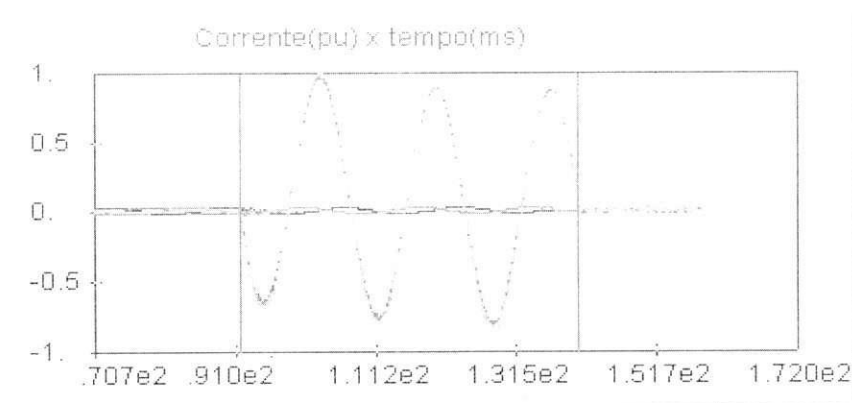
Figura 130 - Delimitação do intervalo de falta para o registro 10 usando:
 (a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)

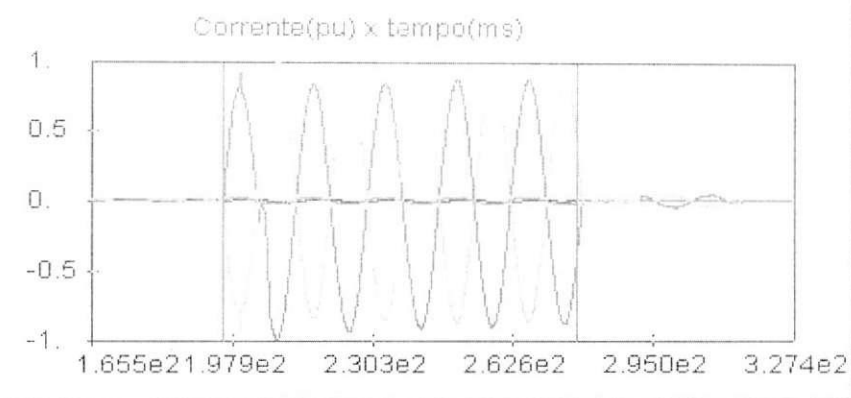


(b)

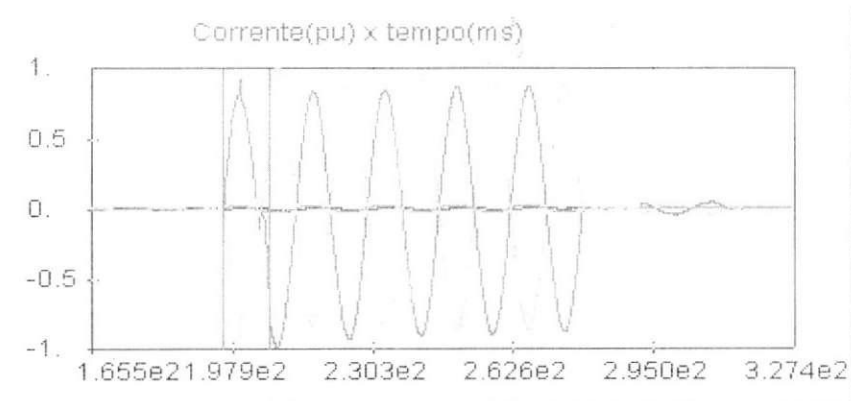


(c)

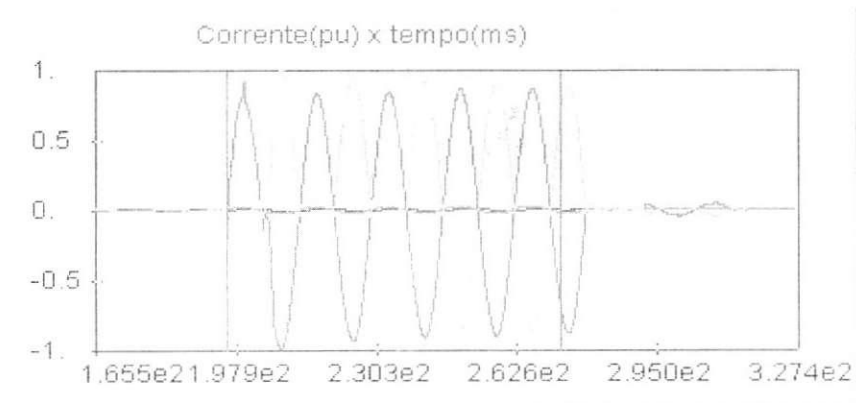
Figura 131 - Delimitação do intervalo de falta para o registro 11 usando:
 (a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)

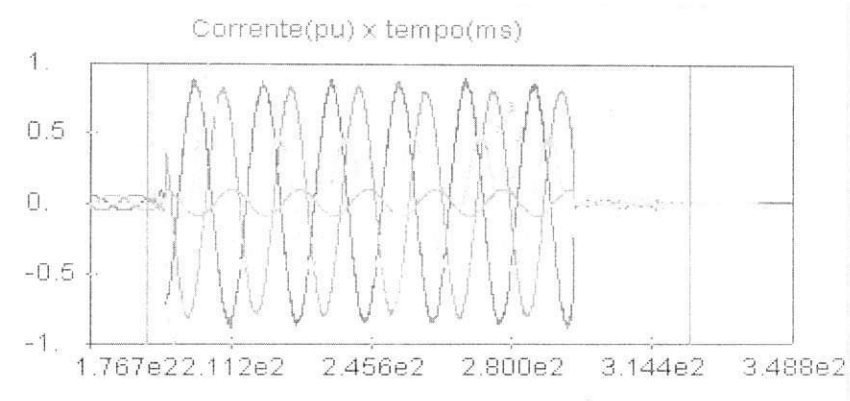


(b)

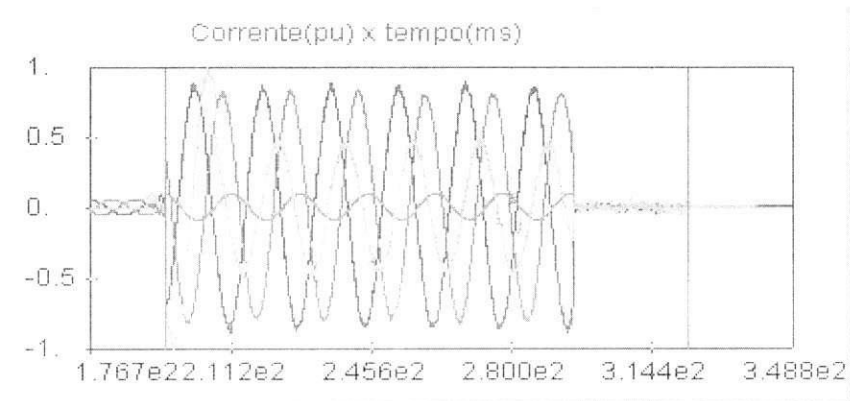


(c)

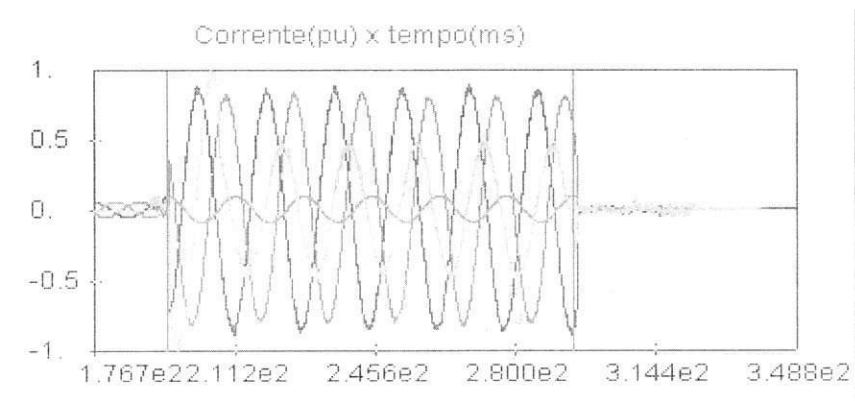
Figura 132 - Delimitação do intervalo de falta para o registro 12 usando:
 (a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)

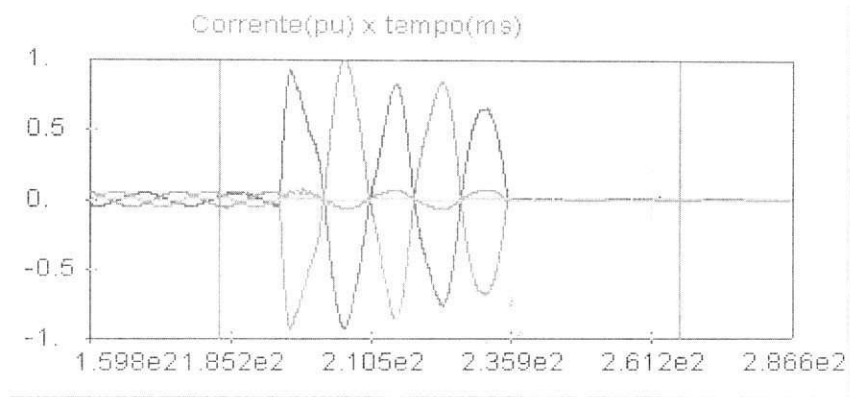


(b)

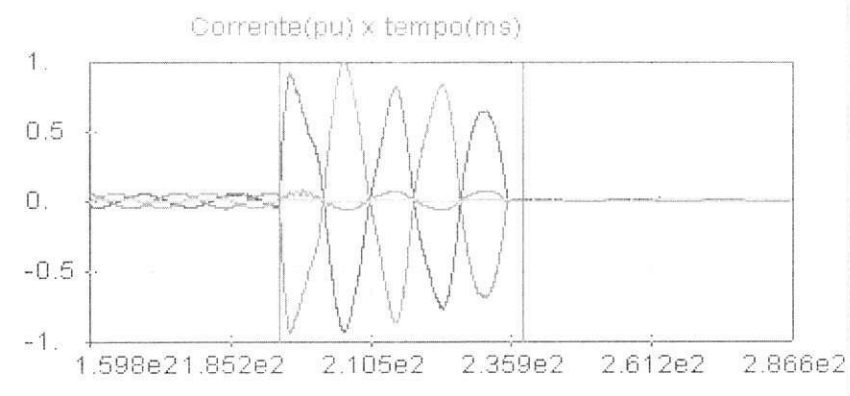


(c)

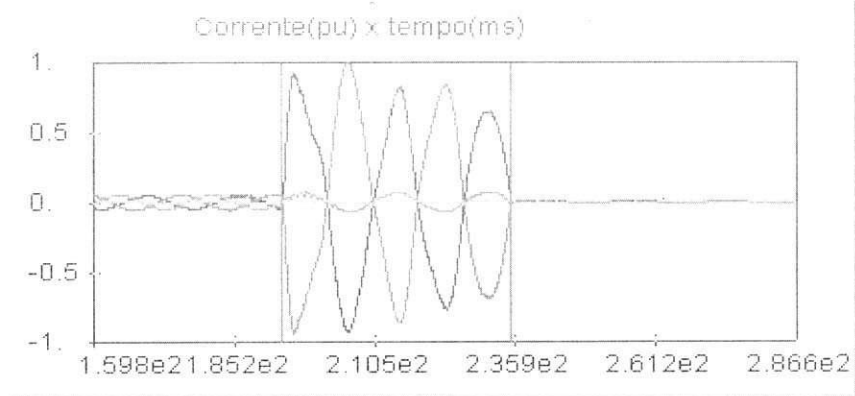
Figura 133 – Delimitação do intervalo de falta para o registro 13 usando:
 (a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.



(a)



(b)



(c)

Figura 134 - Delimitação do intervalo de falta para o registro 14 usando:
 (a) algoritmo I e (b) algoritmo II; (c) algoritmo III.

5. Conclusões

O estudo realizado neste TCC evidenciou a complexidade do problema de diagnóstico de faltas, em particular, da etapa de delimitação do intervalo de falta. Observou-se que o uso das componentes wavelets das correntes é de importância fundamental no processo de detecção deste intervalo. As modificações realizadas no algoritmo original resultaram em melhorias consideráveis.

A avaliação da influência do valor do *threshold* e dos níveis de decomposição, assim como a classificação de faltas e a detecção de outros distúrbios em linha de transmissão, via wavelet, serão realizados pelo aluno durante o Curso de Mestrado, que será iniciado no mês de março do corrente ano.

6. Referências Bibliográficas

- [1] MANUAL DO Neuranálise©, ATECEL/UFCEG - CHESF, julho de 2004.
- [2] NEVES, W. L. A.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A.; FONTES, A. V.; DANTAS, K. M. C.; COSTA, F. B.; FERNANDES, A. B. & SILVA, S. S. B. Influência da frequência de amostragem dos registradores digitais de perturbação no diagnóstico de faltas. *Transmission and Distribution - T&D*, São Paulo, 2004.
- [3] 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.
- [4] 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, 2004.
- [5] YIGANG, Z.; WEYONG, Y.; CHENGJUN, H. & WEN, Z. Partial discharge denoising via lifting scheme. *Proceedings of the International Conference on Power System Technology*, October 2002.
- [6] BORRAS, D.; CASTILLA, M.; MORENO, N. & MONTANO, J. C. Wavelet and neural structure: a new tool for diagnostic of power system disturbances. *IEEE Trans. on Industry Applications*, v. 37, n.1, Jan.-Feb. 2001.