

**FRANCISCO PEREIRA JÚNIOR**

**Detecção de eventos para monitoração de qualidade de energia  
elétrica por medidores de faturamento usando Transformada  
Wavelet e a Norma Euclidiana Instantânea**

**FRANCISCO PEREIRA JÚNIOR**

**Detecção de eventos para monitoração de qualidade de energia  
elétrica por medidores de faturamento usando Transformada  
Wavelet e a Norma Euclidiana Instantânea**

**Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo, como parte dos requisitos  
para a obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Elétrica.**

**São Paulo**

**2009**

**FRANCISCO PEREIRA JÚNIOR**

**Detecção de eventos para monitoração de qualidade de energia elétrica por medidores de faturamento usando Transformada Wavelet e a Norma Euclidiana Instantânea**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.**

**Área de concentração:  
Sistemas de Potência**

**Orientador:  
Prof. Dr. Nelson Kagan**

**São Paulo**

**2009**

**Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.**

**São Paulo, de maio de 2009.**

**Assinatura do autor \_\_\_\_\_**

**Assinatura do orientador \_\_\_\_\_**

## **I. FICHA CATALOGRÁFICA**

**Pereira Júnior, Francisco**

**Detecção de eventos para monitoração de qualidade de energia elétrica por medidores de faturamento usando a Transformada Wavelet e a Norma Euclidiana Instantânea / F. Pereira Júnior. -- ed.rev. -- São Paulo, 2009.**

**136 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.**

**1. Energia elétrica (Qualidade) 2. Instrumentação e medidas elétricas 3. Processamento digital de sinais I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.**

## Dedicatória

*Dedico este trabalho à minha família, que sempre me incentivou e esteve ao meu lado, ajudando a superar os problemas que apareceram pelo caminho. Aos meus pais, Francisco e Lídia, que não tiveram esta oportunidade, mas conseguiram oferecê-la a seus filhos.*

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus por mais esta etapa, que se tornou suave com o nascimento do meu filho.

Ao meu orientador, Professor Nelson Kagan, por todas as contribuições, pelo apoio nos momentos críticos e pela paciência.

Aos Professores Mário Oleskovicz e Sílvio Xavier Duarte pelas recomendações dadas no exame de qualificação.

Aos Professores Carlos Márcio Vieira Tahan e Marcos Roberto Gouvêa que foram meus primeiros contatos na POLI.

À Gilka, pelo apoio e pela paciência de suportar os momentos que precisei me ausentar.

Ao meu irmão Flávio, que já trilhou este caminho e não me deixou desanimar.

Ao pessoal de Itajubá, meu grande amigo e colega de república Professor Marcos Aurélio de Souza que me incentivou a seguir este caminho, Professor Hector Arango que me fez ver a opção por Sistemas de Potência enquanto eu só imaginava o caminho da Eletrônica e Professor Carlos Alberto Mohallen Guimarães (*in memoriam*) que mostrou a oportunidade de voltar aos estudos sem abandonar a carreira na indústria.

Agradeço à Landis+Gyr pela oportunidade de iniciar este trabalho enquanto funcionário.

## Resumo

Este trabalho estuda a possibilidade de se adicionar funções de detecção e registro de eventos, que afetam a qualidade de energia elétrica, aos medidores eletrônicos de faturamento. A presença destes medidores na grande maioria dos consumidores ligados à média tensão transforma este recurso em uma poderosa ferramenta de análise. A existência de canais de comunicação remota nestes medidores facilita a coleta dos dados e seu armazenamento. Estes dados transferidos para sistemas com alta capacidade de processamento permitem uma análise mais precisa dos eventos que ocorrem em toda a rede. Foram consideradas as limitações dos medidores de faturamento quanto à sua capacidade de processamento, memória e taxa de amostragem. Os eventos que podem ser detectados com estes medidores ficam restritos a variações de tensão de curta duração (VTCDs) e transitórios oscilatórios de baixa frequência. As funções criadas para registro de eventos podem ser usadas para registro de sinais em regime permanente, aumentando a capacidade de diagnóstico e análise da qualidade da energia elétrica em locais da rede. São utilizadas como técnicas de detecção de eventos: as variações dos valores eficazes, a decomposição de sinais, a Norma Euclidiana Instantânea (NEI) e a transformada wavelet (TW).

**Palavras-Chave:** Qualidade de energia elétrica. Detecção e registro de sinais. Medidores eletrônicos de faturamento. Leitura remota de medidores. Transformada wavelet. Norma Euclidiana Instantânea.

## **Abstract**

This work shows the possibility to add new functions for detection and registration of disturbances that affect power quality to electronic billing meters. The widespread installation of these meters in the power network makes this resource a powerful analysis tool. Remote communication channels in these meters create an easy way for reading and registering such power quality events. Data transferred to powerful processing systems allow accurate analysis of events occurring in the power grid. The limitations on billing meters, namely processing resources, memory availability and sampling rate, were taken into account. Despite these limitations, the electronic meters can handle short duration voltage events and low-frequency oscillatory transients. Those new functions can also be used for registering steady state phenomena, extending the ability to diagnose power quality problems throughout the power network. Techniques like RMS variations, signal decomposition, instantaneous Euclidian norm and wavelet transform were used for detection of the considered power quality events.

**Key-words:** Electrical power quality. Detection and registration of events. Billing electronic meters. Remote reading of billing meters. Wavelet transform. Instantaneous Euclidian norm.

## Sumário

1	Introdução .....	1
1.1	A evolução dos medidores eletrônicos de faturamento .....	1
1.2	As vantagens dos medidores de faturamento incorporarem indicadores de qualidade de energia .....	2
1.3	Objetivos .....	5
1.4	Organização do documento .....	6
2	Fundamentos Teóricos.....	8
2.1	Características e limitações do medidor estudado .....	8
2.2	Fenômenos que afetam a qualidade de energia .....	10
2.2.1	Eventos transitórios.....	12
2.2.2	Variações de tensão de curta duração .....	14
2.2.3	Variações de tensão de longa duração .....	15
2.2.4	Distorções de forma de onda .....	17
2.2.5	Flutuações de tensão .....	19
2.2.6	Desequilíbrio de tensão.....	20
2.2.7	Variações de frequência.....	21
2.3	Decomposição de sinais.....	22
2.4	Valor eficaz.....	25
2.5	Norma Euclidiana Instantânea (NEI) .....	29
2.6	Transformada wavelet .....	31
3	Revisão Bibliográfica .....	42
3.1	Processamento de sinais .....	42
3.2	Transformada wavelet .....	44
3.3	Valores eficazes .....	47
3.4	Norma Euclidiana Instantânea ( NEI ) .....	48
4	Metodologia utilizada para teste da detecção dos distúrbios .....	50
4.1	Processamento dos sinais para a detecção dos eventos.....	51
4.1.1	Cálculo do valor eficaz .....	51
4.1.2	Cálculo da NEI .....	54
4.1.3	Cálculo do filtro para a decomposição de sinais .....	55
4.1.4	Transformada wavelet.....	57
4.2	Eventos oscilatórios de baixa frequência .....	59
4.2.1	Decomposição do sinal em componente fundamental e residual.....	60
4.2.2	Transformada wavelet.....	68
4.2.3	NEI para detecção de transitórios .....	74
4.3	VTCDs.....	78
4.3.1	Valores eficazes .....	79
4.3.2	Transformada wavelet.....	82
4.3.3	NEI .....	86
5	Resultados de aplicação .....	91
5.1	Tempo de processamento dos sinais e memória necessária.....	91
5.2	Detecção de transitórios oscilatórios.....	93
5.3	Detecção de VTCDs.....	97
6	Conclusões.....	101
6.1	Propostas para novos estudos.....	103
	Referências Bibliográficas .....	105

A. Apêndice .....	109
Eventos reais ocorridos em rede elétrica .....	109
MatLab/Simulink – Modelos utilizados e dados gerados .....	111
Comparações dos dados do simulador de detecções com os dados do Simulink.....	118

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Resultado de leitura das grandezas elétricas.....	4
Figura 1.2 Resultado de leitura de oscilografia. ....	5
Figura 2.1 Simulação do chaveamento de capacitor na rede .....	13
Figura 2.2 Exemplos de afundamentos e elevações de tensão. ....	15
Figura 2.3 Variação das leituras de tensão ao longo de 24 horas.....	17
Figura 2.4 Tensão distorcida pela presença de cargas não-lineares. ....	18
Figura 2.5 Exemplo de flutuação de tensão .....	19
Figura 2.6 Exemplo de desequilíbrio de tensão .....	20
Figura 2.7 Variação da frequência da rede medida durante um dia.....	21
Figura 2.8 Resposta em frequência e fase de filtro passa faixa. ....	23
Figura 2.9 Resposta em frequência e fase de filtro rejeita faixa (Notch). ....	23
Figura 2.10 Decomposição de sinais usando filtro passa-faixa.....	24
Figura 2.11 Decomposição de sinais usando filtro rejeita-faixa.....	25
Figura 2.12 Exemplo de valores eficazes na forma discreta e na forma contínua .....	26
Figura 2.13 Tensões instantâneas e eficazes de um evento na rede .....	28
Figura 2.14 Representação da NEI em dois eventos medidos na rede. ....	31
Figura 2.15 Fator de escala.....	33
Figura 2.16 Fator de deslocamento.....	33
Figura 2.17 Filtros e análise multi-resolução (AMR).....	35
Figura 2.18 Sinal de tensão com transitório oscilatório. ....	40
Figura 2.19 Primeiro nível de decomposição usando a Db2. ....	40
Figura 2.20 Segundo nível de decomposição usando a Db2. ....	41
Figura 2.21 Terceiro nível de decomposição usando a Db2. ....	41
Figura 4.1 Fluxo de dados para cálculo do valor eficaz. ....	53
Figura 4.2 Fluxo de dados para o cálculo da NEI.....	54
Figura 4.3 Fluxo de dados simplificado para o cálculo da NEI .....	55
Figura 4.4 Modelo de filtro IIR na forma direta I. ....	56
Figura 4.5 Modelo de filtro IIR na forma direta II. ....	57
Figura 4.6 Fluxo de dados da TW com um filtro de dimensão 2 .....	58
Figura 4.7 Fluxo de dados da TW com um filtro de dimensão 4 .....	59
Figura 4.8 Resposta de fase e amplitude de um filtro IIR.....	60
Figura 4.9 Detalhe da resposta de amplitude do filtro. ....	61
Figura 4.10 Distribuição das leituras de frequência ao longo de 24 horas .....	61
Figura 4.11 Chaveamento de capacitor ocorrendo em diferentes ângulos. ....	62
Figura 4.12 Duração do evento varia com o nível de detecção utilizado. ....	64
Figura 4.13 Duração de um transitório em função da tensão de detecção. ....	65
Figura 4.14 Transitório registrado em uma rede de distribuição e sua componente residual. ....	68
Figura 4.15 Primeiro nível de detalhes Db1 (Haar) e Db2.....	69
Figura 4.16 Primeiro nível de detalhes Db3 e Db4 .....	70
Figura 4.17 Primeiro nível de detalhes Db8 e Sym8 .....	70
Figura 4.18 Primeiro nível de detalhes Db1 e Db2.....	71
Figura 4.19 Primeiro nível de detalhes Db3 e Db4 .....	71
Figura 4.20 Primeiro nível de detalhes Db8 e Sym8 .....	71

Figura 4.21 NEI aplicada a um transitório oscilatório .....	74
Figura 4.22 Evento ocorrendo em mais de uma fase e NEI .....	75
Figura 4.23 Valor eficaz deslizante e discreto .....	79
Figura 4.24 Afundamento de tensão ocorrendo próximo da passagem por zero do sinal de tensão. ....	81
Figura 4.25 Afundamento de tensão ocorrendo próximo ao pico do sinal de tensão .....	82
Figura 4.26 Primeiro nível de detalhes de um afundamento de tensão .....	83
Figura 4.27 Primeiro nível de detalhes de uma elevação de tensão .....	84
Figura 4.28 Afundamento de tensão não detectado pela wavelet Db1 e detectado pela wavelet Db3 .....	85
Figura 4.29 NEI detectando afundamentos de tensão de diferentes durações	86
Figura 4.30 NEI detectando elevações de tensão de diferentes durações .....	87
4.31 NEI em eventos múltiplos .....	88
Figura 4.32 Comparação da NEI e valor eficaz na detecção de afundamento	89
Figura 5.1 Dados da tabela 5.1 apresentados em forma gráfica .....	95
Figura 5.2 Dados da tabela 5.2 apresentados em forma gráfica .....	96
Figura 5.3 Transitório em fase sã dando falsa indicação de VTCD .....	100
Figura A.1 Evento_002 .....	109
Figura A.2 Evento_003 .....	109
Figura A.3 Evento_005 .....	109
Figura A.4 Evento_009 .....	110
Figura A.5 Evento_012 .....	110
Figura A.6 Evento_013 .....	110
Figura A.7 Evento_060 .....	110
Figura A.8 Circuito usado para a simulação de transitórios e VTCDs .....	111
Figura A.9 Exportação dos valores instantâneos do Simulink para o MatLab	113
Figura A.10 Parâmetros de variável exportada para o MatLab com tempo de amostragem de 256,4 $\mu$ s .....	113
Figura A.11 Cálculo da NEI no Simulink e exportação para o MatLab .....	114
Figura A.12 Cálculo dos valores eficazes e exportação para o MatLab .....	115
Figura A.13 Parâmetros do cálculo do valor eficaz .....	115
Figura A.14 Decomposição em componentes fundamental e residual .....	116
Figura A.15 Exemplo de programa para controle de múltiplas simulações com variação de parâmetros .....	117
Figura A.16 Afundamento de tensão gerado no Simulink .....	119
Figura A.17 Afundamento de tensão visto a partir do programa de análise ...	119
Figura A.18 Tensão eficaz calculada pelo Simulink .....	120
Figura A.19 Tensão eficaz calculada pelo programa de análise .....	120
Figura A.20 NEI calculada pelo Simulink .....	121
Figura A.21 NEI calculada pelo programa de análise .....	121
Figura A.22 Primeiro nível de detalhes (DB2) calculados no MatLab .....	122
Figura A.23 Primeiro nível de detalhes (DB2) do programa de análise .....	122
Figura A.24 Primeiro nível de detalhes (DB8) calculados no MatLab .....	123
Figura A.25 Primeiro nível de detalhes (DB8) do programa de análise .....	123
Figura A.26 Componente residual de transitório gerada pelo Simulink .....	124
Figura A.27 Residual de transitório calculado no programa de análise .....	124

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Classificação de fenômenos de qualidade de energia que afetam a rede elétrica.....	11
Tabela 2.2 Conteúdo de frequência dos vários níveis de decomposição.....	37
Tabela 2.3 Filtros de decomposição - Haar.....	38
Tabela 2.4 Filtros de decomposição Db2 .....	38
Tabela 2.5 Filtros de decomposição Db3 .....	38
Tabela 2.6 Filtros de decomposição Db4 .....	38
Tabela 2.7 Filtros de decomposição Db8 .....	39
Tabela 2.8 Filtros de decomposição Sym8 .....	39
Tabela 3.1 Protocolos avaliados .....	48
Tabela 4.1 Detecção dos eventos com diferentes valores de limiar de detecção. ....	66
Tabela 4.2 Detecção dos eventos com diferentes valores de limiar de detecção e presença de distorção harmônica. ....	67
Tabela 4.3 Dimensão dos filtros de decomposição de alguma wavelets .....	69
Tabela 4.4 Detecção utilizando as wavelets Db1, Db2 e Db3 em ambiente sem distorção harmônica .....	72
Tabela 4.5 Detecção utilizando as wavelets Db1, Db2 e Db3 em ambiente com distorção harmônica .....	73
Tabela 4.6 Detecção de transitórios utilizando NEI sem a presença de distorção harmônica.....	76
Tabela 4.7 Detecção de transitórios utilizando NEI na presença de harmônicos. ....	77
Tabela 4.8 Uso do valor eficaz para detecção de afundamentos de tensão em sinais com e sem distorção harmônica. ....	81
Tabela 4.9 Índices de detecção de VTCDs utilizando a transformada wavelet,85	
Tabela 4.10 Eficiência da NEI para detecção de VTCDs .....	89
Tabela 5.1 Eficiência (%) na detecção de transitórios sem distorção harmônica. ....	94
Tabela 5.2 Eficiência (%) na detecção de transitórios com distorção harmônica. ....	96
Tabela 5.3 Eficiência dos métodos testados para detecção de VTCDs em circuitos sem distorção harmônica .....	98
Tabela 5.4 Eficiência dos métodos testados para detecção de VTCDs em circuitos com distorção harmônica .....	99

---

## Capítulo I

### 1 Introdução

#### 1.1 A evolução dos medidores eletrônicos de faturamento

Na década de 1970 surgiram os primeiros transdutores eletrônicos [1] usados pelas concessionárias para medição de energia e demanda. Apesar do seu alto custo, quando comparado ao custo do medidor eletromecânico, estes transdutores apresentavam maior estabilidade e precisão. Por estas características eles começaram a ser usados em aplicações especiais, como por exemplo, medição de fronteira, que necessitam de medidores mais precisos. Estes transdutores possuíam uma saída analógica, de tensão ou corrente contínua, proporcional à potência medida. Também possuíam uma saída de pulsos para a energia medida. A saída analógica de demanda podia ser ligada a instrumentos indicadores de painel ou a registradores gráficos, enquanto a saída de pulsos podia ser ligada a contadores eletromecânicos ou registradores eletrônicos.

Na década seguinte, os registradores eletrônicos micro-processados começaram a ser usados em conjunto com medidores eletromecânicos. Detectores de rotação do disco do medidor eletromecânico emitiam pulsos que eram armazenados nestes registradores. Estes registradores eram capazes de realizar funções complexas que não podiam ser feitas pelos medidores

---

eletromecânicos, como cálculo de demanda deslizante, tarifas horo-sazonais e detecção de fraudes.

Os primeiros medidores totalmente eletrônicos de faturamento da década de 1980 tinham custo elevado e só eram usados em aplicações especiais que necessitavam de medição de alta precisão. Na década de 1990 surgiram medidores eletrônicos com preços competitivos e com recursos que não podiam ser oferecidos pelos medidores eletromecânicos, por exemplo, diagnóstico da instalação, capacidade de comunicação remota e registro de eventos que influem na qualidade da energia elétrica. Diagnósticos como a detecção de inversão de polaridade dos transformadores de medição ou de inversão de seqüência de fase reduzem os erros de instalação e conseqüentemente o custo de implantação.

Este trabalho estuda a possibilidade de incluir novos recursos aos medidores de faturamento, com a criação de funções que até o momento só existem em analisadores de qualidade de energia. Considerando a necessidade de manter o custo baixo para estes medidores, estas novas funções não podem exigir recursos de processamento ou memória para armazenamento de dados que venham a encarecer o produto. Este trabalho leva em conta estas limitações dos medidores atuais e procura encontrar soluções que possam ser aplicadas a medidores já instalados em consumidores.

## **1.2 As vantagens dos medidores de faturamento incorporarem indicadores de qualidade de energia**

Após o processo de privatização das distribuidoras de energia elétrica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) passou a definir os níveis

---

mínimos de qualidade de energia. A regulamentação de continuidade de fornecimento foi feita através da Resolução ANEEL 024 - 2000 [2] e logo a seguir a regulamentação dos níveis de tensão pela Resolução ANEEL 505 - 2001 [3]. Campanhas de medição, para verificar a conformidade dos níveis de tensão ou de outros parâmetros de qualidade, obrigam as distribuidoras a instalar medidores especiais em diversos pontos da rede.

Os medidores eletrônicos de faturamento já estão instalados em grande parte da rede de distribuição. Adicionar funções de qualidade de energia a estes medidores pode reduzir o custo destas campanhas de medição.

A NBR 14522 [4] define o protocolo de comunicação e quais os dados que devem ser armazenados nos medidores eletrônicos de faturamento. Todas as informações que a concessionária necessita para o faturamento de energia e demanda já estão definidas nesta norma, porém o registro e armazenamento de indicadores de qualidade de energia ainda estão sendo discutidos e incorporados nas revisões da norma. O primeiro registro capaz de fornecer alguma informação sobre a qualidade de energia da rede, definido nesta norma, foi o armazenamento da ocorrência das 20 últimas interrupções com o registro do horário de seu início e do horário de retorno da energia.

Como forma de agregar valor ao seu produto, alguns fabricantes adicionaram outros recursos de monitoração da qualidade de energia aos medidores mais sofisticados. Um destes recursos foi o registro das leituras de valores eficazes das tensões, correntes e potências. No início, cada fabricante adotou um conteúdo e um formato diferente para estes registros. Quando as concessionárias passaram a usar estas leituras como forma de diagnóstico das instalações e identificação de tentativas de fraude, criou-se a necessidade de

padronizar o conteúdo e o formato destes dados. Este recurso foi padronizado e incluído em uma revisão da NBR14522 em 2003.

Um exemplo de leitura destes registros é mostrado na figura 1.1, onde podem ser vistos os resultados de leitura de tensão, corrente, potências ativas e reativas de todas as fases, ângulo entre as tensões de fase, bem como informações sobre o número de série do medidor, data e hora da leitura.

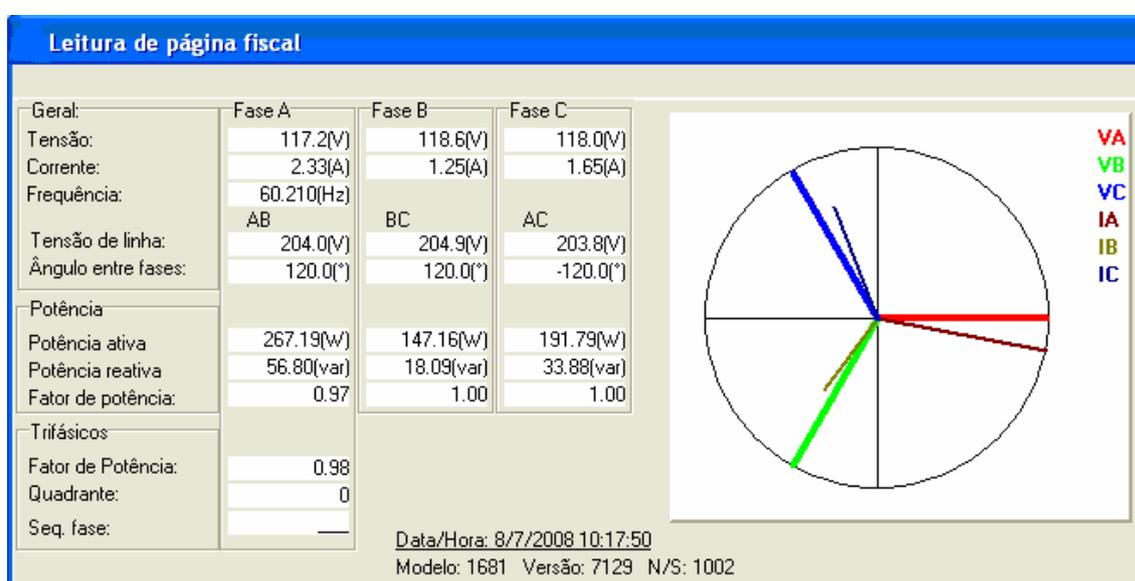


Figura 1.1 Resultado de leitura das grandezas elétricas.

Outro recurso presente em alguns modelos de medidores, mas que ainda não foi padronizado na NBR14522, é a oscilografia. Os medidores de faturamento capazes de registrar a forma de onda de tensão e corrente, mesmo que por alguns ciclos, tornaram-se ferramentas de análise poderosas. Com a oscilografia e os recursos de comunicação remota, disponíveis em vários modelos de medidores, a identificação de problemas como inversão de transformadores de tensão ou corrente, distorções harmônicas e outros em regime permanente pode ser feita a partir de uma central de leitura da

concessionária de energia, sem precisar deslocar uma equipe para a instalação de um analisador de qualidade de energia no local. Um exemplo de leitura de oscilografia pode ser visto na figura 1.2, que mostra alguns ciclos de tensão e corrente das três fases que foram registrados por um medidor de faturamento.

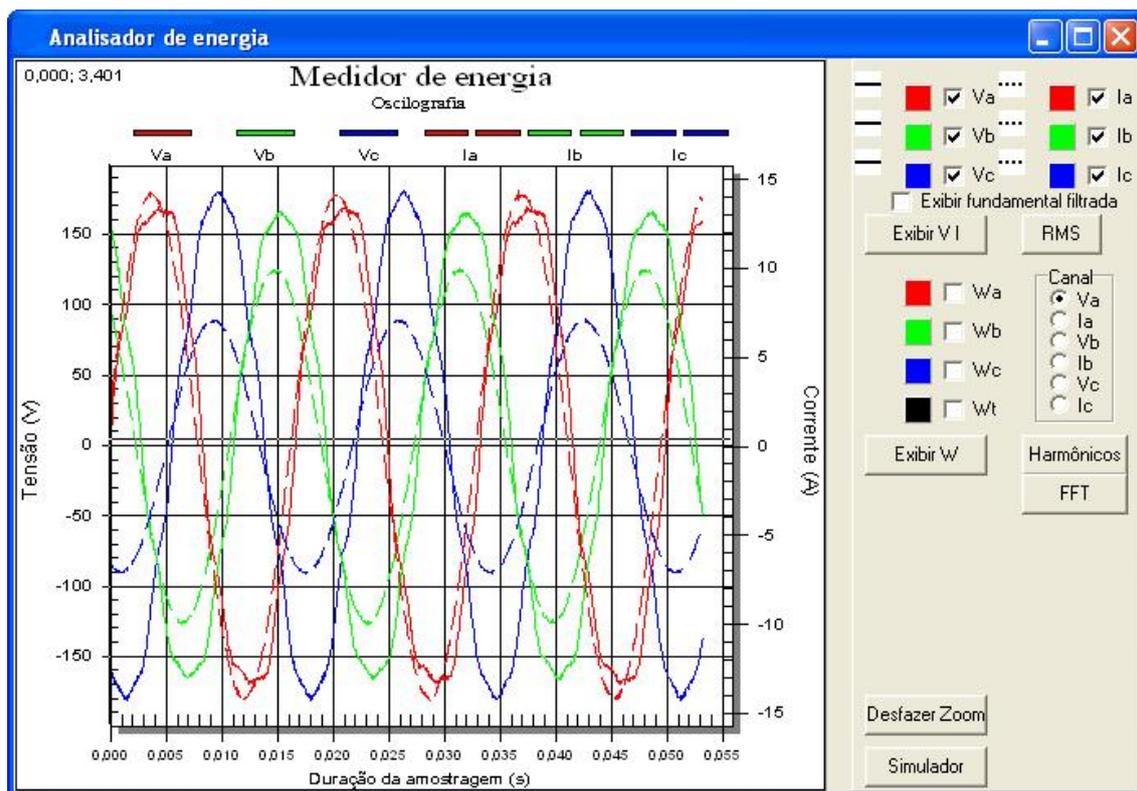


Figura 1.2 Resultado de leitura de oscilografia.

### 1.3 Objetivos

Analisando a situação atual dos medidores eletrônicos de faturamento, verificou-se que existe um grande número de medidores eletrônicos já instalados que não possui funções de registro de qualidade de energia. Também foi verificado que grande parte destes medidores é capaz de receber atualizações de programas com a inclusão de recursos de monitoração e registro da qualidade de energia. Outros modelos de baixo custo não são

---

capazes de receber atualizações de programa e não farão parte deste estudo, que procura acrescentar funções aos medidores sem necessidade de alterações nos seus circuitos eletrônicos.

A partir dos dados de oscilografia, pretende-se criar métodos capazes de detectar e registrar eventos que afetam a qualidade de energia. Um padrão para registro de oscilografia e padrões para registro de eventos e suas características deverão fazer parte de versões futuras da NBR 14522. Na inexistência destes padrões, foram usados os formatos definidos para o medidor estudado.

Foram estabelecidos três objetivos principais para este trabalho:

- Estudar os fenômenos que afetam a qualidade de energia, quais os mais freqüentes, quais os parâmetros necessários para caracterizá-los, como detectá-los e quais os fatores que limitam esta detecção.
- Estudar técnicas de detecção de eventos que necessitem de poucos recursos de processamento e possam ser usadas em medidores de faturamento de energia elétrica.
- Simular um conjunto de eventos e verificar a eficiência das técnicas de detecção estudadas. Comparar a eficiência de detecção das várias técnicas com a necessidade de processamento e memória de cada uma delas.

#### **1.4 Organização do documento**

No capítulo 2 são estudados alguns fenômenos que afetam a qualidade de energia e selecionados aqueles que podem ser detectados por medidores de faturamento, levando em consideração as suas limitações. Também são

---

estudadas técnicas de detecção de eventos e processamento de sinais, sua teoria e como aplicá-las a um medidor de faturamento.

A revisão bibliográfica no capítulo 3 comenta os trabalhos que serviram de base na detecção de eventos e no estudo destes fenômenos.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia, o desenvolvimento dos programas de detecção, as simulações e a análise de compatibilidade com os recursos do medidor.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com as técnicas desenvolvidas no capítulo anterior. São apresentadas comparações entre os métodos de detecção no que se refere ao índice de acerto e tempo de processamento.

As conclusões avaliam os resultados obtidos na detecção de novos eventos e uso de outras técnicas. Também são considerados se os tempos de processamento são adequados para uso com o medidor. Finalmente são apresentadas recomendações para outros trabalhos que podem ser desenvolvidos a partir deste.

---

## Capítulo II

### 2 Fundamentos Teóricos

Neste capítulo são apresentados alguns fenômenos que afetam a qualidade de qualidade de energia e entre eles os eventos que serão considerados para detecção. Também, são definidas as limitações do medidor usado neste estudo para detectar tais eventos. Na seqüência são apresentados os fundamentos teóricos de várias técnicas usadas na detecção dos eventos: o cálculo do valor eficaz, a decomposição de sinais, a transformada wavelet e a Norma Euclidiana Instantânea.

#### 2.1 Características e limitações do medidor estudado

Um dos objetivos deste estudo é a criação de novos recursos para a detecção e registro de eventos de qualidade de energia, que possam ser incluídas no programa de medidores de faturamento já existentes no mercado. Normalmente, estes medidores possuem baixa taxa de amostragem dos sinais (32 ou 64 amostras por ciclo de 60 Hz) e sua capacidade de processamento de dados e memória não podem ser alteradas.

Uma funcionalidade muito importante do medidor estudado é sua capacidade de receber atualizações de seu programa, mesmo depois de instalado no consumidor. Assim, as novas funções desenvolvidas poderão ser incorporadas aos novos medidores fabricados e aos antigos já instalados.

---

O medidor estudado realiza a captura de sinais a uma taxa de 65 amostras por ciclo de 60 Hz que, de acordo com o teorema da amostragem de Nyquist [9], tem seu uso limitado ao estudo de fenômenos com frequências de até 1950 Hz. Entre cada amostragem, que ocorre em intervalos de 256,4  $\mu$ s, são realizados cálculos de tensões, correntes e energias de cada fase. O medidor também precisa calcular a energia de acordo com a tarifa do horário, atualizar o display, verificar o pressionamento de botões de controle, controlar as portas de comunicação e várias outras tarefas. As novas funções de detecção de eventos precisam ser inseridas no tempo livre de processamento, sem comprometer o desempenho do medidor.

Outras características do medidor são que o processador opera a 32 MHz, a área de memória de programa externa é de 128 kbytes e uma área de armazenamento de dados externa é de 64 kbytes.

O recurso de oscilografia, que já existe no medidor, permite o registro de 260 amostras de cada um dos três canais de tensão e dos três canais de corrente; porém, não existe uma forma de sincronizar o início da oscilografia com um evento específico. Este recurso pode ser melhorado, com a criação de comandos que indiquem o número de amostras que devem ser armazenadas e quais os canais que devem ser armazenados. Uma função que dê início a um registro de oscilografia, quando forem detectados eventos ocorridos na rede, também representa uma melhora significativa a este recurso.

A base de tempo do medidor tem resolução de 1 segundo. Portanto, não é possível usar esta base de tempo para registrar os instantes de início e fim de um evento. Os cristais utilizados como base de tempo do processador são precisos e estáveis, permitindo que a contagem das amostras do conversor

---

A/D determine a duração dos eventos com resolução de 256.4  $\mu$ s. A programação do relógio dos medidores não é feita por equipamento de precisão, nem é verificada ou corrigida periodicamente; portanto, o horário de ocorrência do evento está sujeito aos mesmos erros que o relógio do medidor.

## **2.2 Fenômenos que afetam a qualidade de energia**

Bollen [12] classifica as perturbações do sistema elétrico em dois grupos: variações e eventos.

Variações são ocorrências em regime permanente que devem ser tratadas de forma estatística. O resultado deste processamento estatístico reflete os limites de variação das grandezas elétricas do sistema. A medição das variações das grandezas elétricas do sistema de distribuição deve ser feita de forma contínua, do mesmo modo que é feita a medição do consumo de energia.

Eventos são ocorrências transitórias que podem ser caracterizadas como tendo um início, uma amplitude e um final. Normalmente são provocadas por alterações abruptas na condição operativa do sistema, como: chaveamento de cargas de alta potência, chaveamento de bancos de capacitores, chaveamento de transformadores, faltas entre fases ou entre fase e terra, descargas atmosféricas, etc. A identificação e o registro de alguns destes eventos é um dos objetivos deste trabalho. A medição de eventos que ocorrem na rede de distribuição é feita de modo semelhante ao funcionamento de relés de proteção: quando se detecta um evento é disparado um procedimento para registro do mesmo.

A tabela 2.1 mostra a classificação dos fenômenos que ocorrem em um sistema de potência de acordo com [5] e [10]. Os fenômenos são classificados em sete categorias e a tabela mostra o conteúdo espectral, a duração e a amplitude de cada fenômeno.

<b>Categoria</b>	<b>Conteúdo espectral</b>	<b>Duração</b>	<b>Amplitude</b>
<b>1 ) Transitórios</b>			
<b>1.1 ) Impulsivos</b>			
Nanosegundo	5 ns	< 50 n	
Microsegundo	1 $\mu$ s	50 ns a 1 ms	
Milisegundo	0,1 ms	> 1ms	
<b>1.2 ) Oscilatórios</b>			
Baixa frequência	< 5 kHz	3 – 50 ms	0,4 pu
Média frequência	5 – 500 kHz	20 $\mu$ s	0,4 pu
Alta frequência	0,5 – 5 MHz	5 $\mu$ s	0,4 pu
<b>2 ) Variações de tensão de curta duração</b>			
<b>2.1 ) Instantâneas</b>			
Afundamentos		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
Elevações		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
<b>2.2 ) Momentâneas</b>			
Interrupções		0,5 ciclo – 3 s	< 0,1 pu
Afundamentos		30 ciclos – 3 s	0,1 – 0,9 pu
Elevações		30 ciclos – 3 s	1,1 – 1,4 pu
<b>2.3 ) Temporárias</b>			
Interrupções		3 s – 1 minuto	< 0,1 pu
Afundamentos		3 s – 1 minuto	0,1 – 0,9 pu
Elevações		3 s – 1 minuto	1,1 – 1,2 pu
<b>3 ) Variações de tensão de longa duração</b>			
Interrupções		> 1 minuto	0,8 – 0,9 pu
Subtensões		> 1 minuto	1,1 – 1,2 pu
Sobretensões		> 1 minuto	0,0 pu
<b>4 ) Distorção de forma de onda</b>			
Harmônicos	0 – 100°	Regime permanente	0 – 20%
Interharmônicos	0 – 6 kHz	Regime permanente	0 – 2%
Ruído	Faixa ampla	Regime permanente	0 – 1%
Componente CC		Regime permanente	0 – 0,1%
<b>5 ) Flutuações</b>			
	< 25 Hz	Intermitente	0,1 – 7%
<b>6 ) Desequilíbrios</b>			
		Regime permanente	0,5 – 2%
<b>7 ) Variações de frequência</b>			
		< 10 s	

Tabela 2.1 Classificação de fenômenos de qualidade de energia que afetam a rede elétrica.

---

Esta tabela é apresentada por vários autores e pode ser vista na IEEE 1159-1995 [5], em Dugan [10] e em Bollen [12]. Pequenas diferenças entre elas podem ser identificadas, como a classificação de interrupções de curta duração apenas em momentâneas e temporárias pela IEEE 1159-1995 [5] e por Bollen [12], ou classificadas como instantâneas, momentâneas e temporárias por Dugan [10]. Porém, a estrutura principal desta classificação se mantém a mesma para a maioria dos autores e pesquisadores na área de qualidade da energia elétrica.

Na seqüência são vistos com detalhes os grupos de fenômenos da tabela 2.1 e quais os eventos que se pretende detectar com os medidores de faturamento, sem que sejam necessárias alterações no circuito eletrônico dos medidores.

### **2.2.1 Eventos transitórios**

Este primeiro grupo de eventos engloba os transitórios impulsivos e oscilatórios. Os transitórios impulsivos são produzidos por descargas atmosféricas e são de curta duração. Medidores de faturamento amostram o sinal em uma frequência muito baixa que não permite a detecção deste tipo de evento. Estes medidores também possuem circuitos de proteção em suas entradas que limitam os picos de tensão, distorcendo o sinal caso ele seja de longa duração e venha a ser detectado.

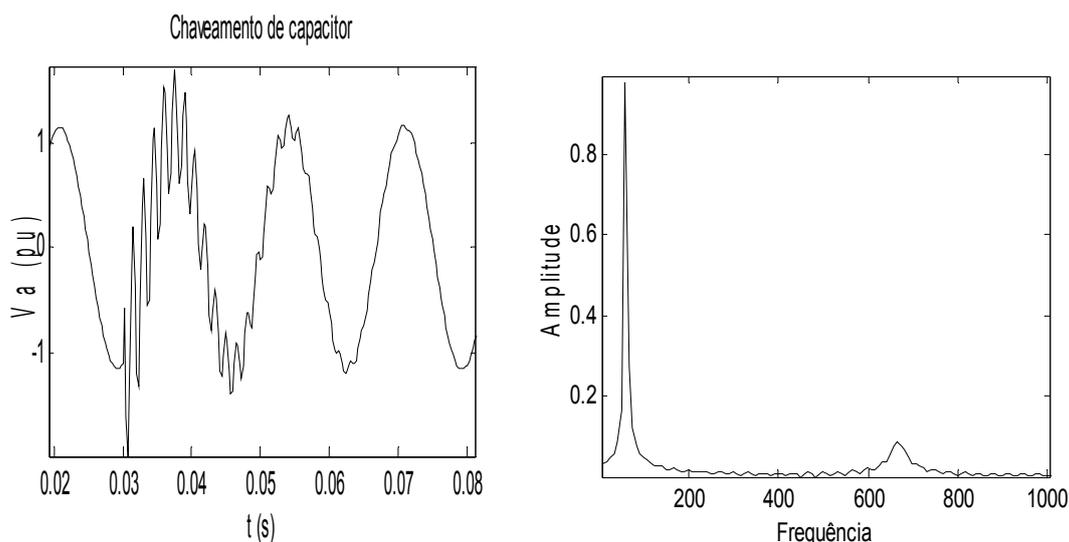
Os transitórios oscilatórios ocorrem em operações normais do sistema, tais como chaveamento de bancos de capacitores, energização de transformadores e chaveamento de disjuntores entre outros. O interesse em detectar este tipo de evento é grande, pois estas manobras são frequentes na rede de

distribuição. Além disso, se for possível associar um evento a uma manobra na rede, podem ser feitas alterações nos procedimentos ou na configuração da rede, reduzindo o tempo de duração do evento ou sua amplitude, levando à melhoria da qualidade da energia fornecida.

A baixa frequência de amostragem dos medidores de faturamento limita a frequência máxima dos transitórios que podem ser detectados. No caso do medidor usado como referência neste estudo, já descrito no item 2.1, a maior frequência que se pode detectar é 1950 (Hz).

Santos [13] cita neste artigo sobre caracterização de eventos na rede de distribuição que o chaveamento de capacitores é um dos eventos mais comuns em sistemas de distribuição e que a sua frequência típica se situa entre 300 e 1000 Hz, portanto, dentro da capacidade de detecção do medidor estudado.

Na figura 2.1 apresenta-se o resultado de uma simulação de transitório produzido pelo chaveamento de capacitores.



(a) Sinal da fase onde ocorreu o chaveamento (b) Espectro de frequência do sinal

Figura 2.1 Simulação do chaveamento de capacitor na rede

Na figura 2.1(a) pode-se observar a frequência de oscilação em torno de 700 Hz do transitório com um pico no instante do chaveamento e o decaimento

---

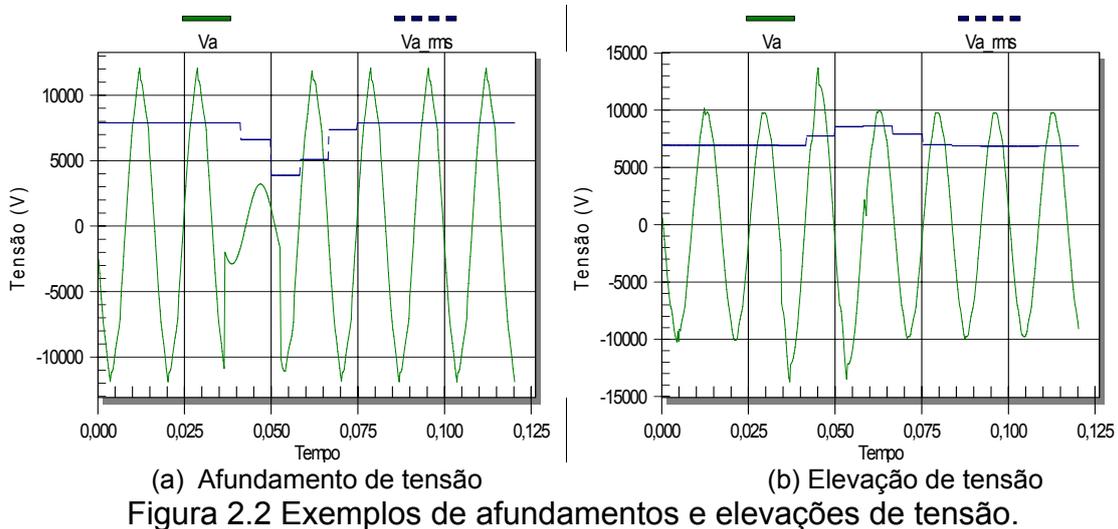
exponencial. A figura 2.1(b) mostra a análise no domínio da frequência, com a componente fundamental de 60 Hz se destacando e um pico em torno de 700 Hz representando o sinal produzido pelo chaveamento do capacitor. A resposta no domínio da frequência foi obtida utilizando o programa MatLab com sua função FFT, aplicada a todos os ciclos do sinal de tensão simulado. O eixo das abscissas foi normalizado para representar o valor real das frequências.

### **2.2.2 Variações de tensão de curta duração**

As variações de tensão de curta duração (VTCDs) também são de grande interesse neste trabalho, pois são eventos bastante freqüentes no sistema elétrico. O medidor estudado permite detectar alguns destes eventos analisando as variações dos valores eficazes fora dos limites, porém o tempo relativamente longo de integração e a resolução de tempo reduzem sua eficiência para eventos com duração inferior a dois ciclos. Estima-se que com as técnicas estudadas neste trabalho aplicadas ao medidor, a eficiência de detecção de afundamentos e elevações de tensão de curta duração aumentará.

Afundamentos e elevações momentâneos e temporários de tensão não apresentam dificuldade para detecção, mesmo para medidores dedicados a faturamento e que utilizam apenas o cálculo do valor eficaz como método de detecção. Interrupções também podem ser detectadas com facilidade, porém nos medidores de energia a fonte de alimentação não mantém o processador do medidor ativo durante as interrupções. Isto faz com que o cálculo da duração da interrupção apresente um erro, pois no retorno da rede a fonte de alimentação pode demorar alguns ciclos para estabilizar. Medidores que

precisam registrar com precisão a duração das interrupções utilizam um sistema de alimentação auxiliar, em alguns casos, baterias ou linhas de tensão contínua mantêm o medidor funcionando o tempo todo.



A figura 2.2 mostra as simulações de um afundamento de tensão em (a) e de uma elevação de tensão em (b). O valor instantâneo da tensão é mostrado com uma linha contínua e o cálculo valor eficaz com janela de meio ciclo é mostrado com uma linha tracejada.

### 2.2.3 Variações de tensão de longa duração

De acordo com a classificação da tabela 2.1, as variações de tensão de longa duração são caracterizadas por desvios dos valores adequados da tensão por períodos superiores a um minuto. Sobretensões e subtensões desta natureza podem ser produzidos pela variação de cargas conectadas à rede, pelo chaveamento de bancos de capacitores ou pela falha de atuação de reguladores de tensão. Interrupções de longa duração costumam ser

---

produzidas por atuação dos sistemas de proteção e normalmente necessitam de intervenção da concessionária para o retorno do fornecimento de energia.

A regulamentação brasileira sobre variações de tensão e interrupções no fornecimento de energia apresentam algumas diferenças em relação à classificação da tabela 2.1.

A resolução 505/2001 da ANEEL [3], que define os níveis adequados de fornecimento de tensão, determina que o valor eficaz da tensão deve ser medido em intervalos de 10 minutos.

A resolução 024/2000 da ANEEL [2], que define a continuidade do fornecimento, considera como interrupções de tensão de longa duração aquelas com duração igual ou superior a três minutos.

A Figura 2.3 mostra a leitura de tensão de uma fase de tensão em um consumidor residencial ao longo de 24 horas. Cada ponto registrado corresponde ao valor eficaz calculado em um intervalo de 10 minutos. A tensão nominal deste consumidor é 115 V. Pela resolução 505 [3], os limites adequados deste consumidor se situam entre 108 V e 127 V e a monitoração deve ser feita durante um período de 168 horas. Nesta monitoração de 24 horas, feita com o objetivo de ilustrar este trabalho, não ocorreram violações de tensão. É possível notar a variação da tensão da rede ao longo do dia, sendo que as causas mais prováveis da variação sejam a entrada e saída de cargas. Reguladores de tensão podem ser instalados na rede de distribuição para atuar em determinados instantes de forma a manter a tensão dentro dos limites adequados.

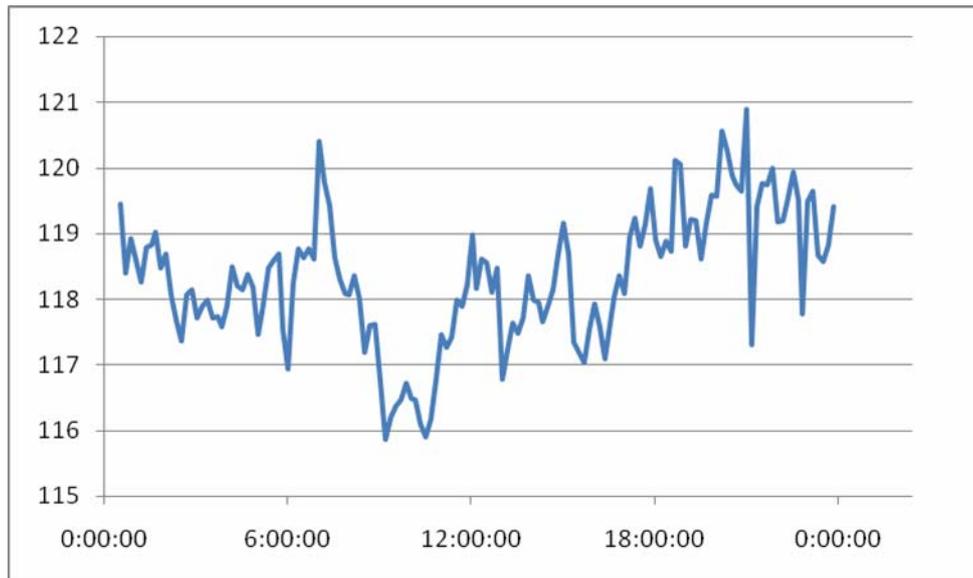


Figura 2.3 Variação das leituras de tensão ao longo de 24 horas

A detecção de variações de tensão de longa duração não fará parte deste estudo, pois os medidores podem facilmente registrá-las verificando se o valor eficaz da tensão está fora dos limites adequados.

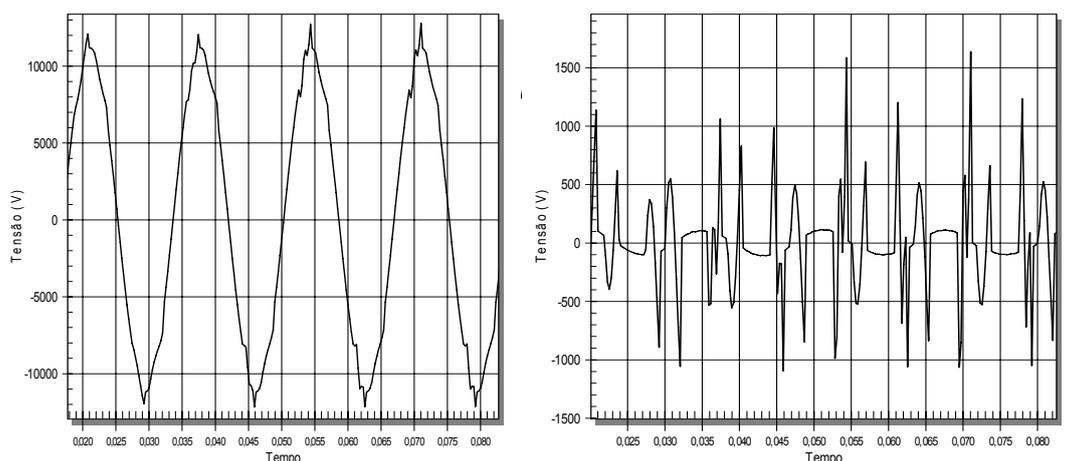
#### 2.2.4 Distorções de forma de onda

As distorções de forma de onda são causadas principalmente por cargas não lineares conectadas à rede. Geralmente são fenômenos que ocorrem em regime permanente. Sua detecção não seria motivo para iniciar um registro de oscilografia e, portanto, não serão estudadas técnicas de detecção para este tipo de fenômeno no presente trabalho. O medidor estudado já realiza o cálculo da distorção harmônica total (DHT) e armazena os dados das três fases de tensão. O recurso de oscilografia, em conjunto com programas de análise de

harmônicos, são ferramentas bastante úteis para diagnóstico de distorções de forma de onda.

Por se tratar de um fenômeno cada vez mais presente na rede elétrica e que influencia fortemente a qualidade da energia elétrica, as simulações de eventos para teste das técnicas de detecção deste trabalho serão feitas nas duas situações: em ambiente sem a presença de distorção harmônica e em ambiente com a presença de distorção harmônica.

Na figura 2.4 pode-se observar uma simulação onde a tensão da rede (a) fica distorcida pela presença de cargas não lineares. Usando uma técnica de decomposição de sinais é possível separar este sinal distorcido em um sinal com a componente fundamental de 60 Hz e um sinal residual. Esta técnica de decomposição de sinais é descrita no item 2.3 deste trabalho. Na figura 2.4(b) pode ser visto este sinal residual.



(a) Sinal distorcido da rede (b) Sinal contendo apenas componentes harmônicos  
Figura 2.4 Tensão distorcida pela presença de cargas não-lineares.

### 2.2.5 Flutuações de tensão

O medidor estudado não possui recursos para detectar e analisar as flutuações de tensão, mas técnicas que requerem pouco processamento podem ser usadas para detectá-las e para localizar se a fonte da flutuação está a montante ou a jusante do medidor. Axelberg apresentou em [26] um trabalho em que mostra que se a flutuação de corrente ocorre em fase com a flutuação de tensão, o evento que provocou esta flutuação está entre o medidor e a fonte de energia. O contrário, ou seja, quando a flutuação de corrente apresenta fase oposta à flutuação de tensão, indica que o evento está sendo produzido entre o medidor e a carga conectada a ele.

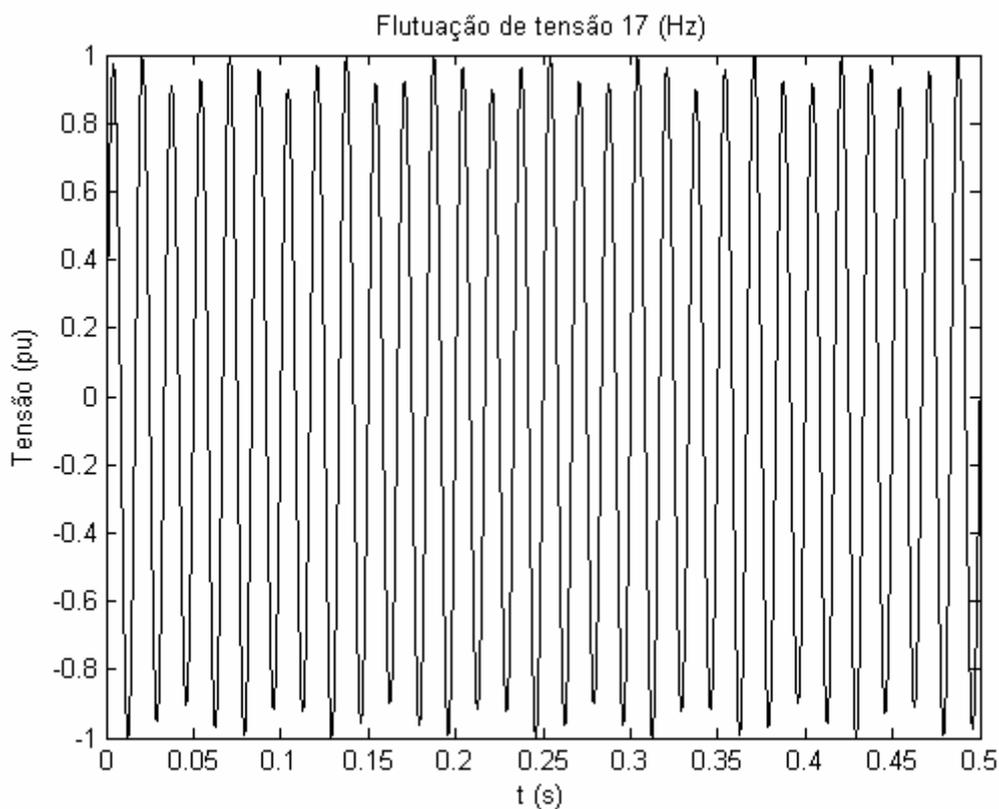


Figura 2.5 Exemplo de flutuação de tensão

Na figura 2.5 é mostrada uma simulação de flutuação de tensão com frequência de 17 Hz. Detecção e registro de flutuações de tensão não serão tratados neste trabalho.

### 2.2.6 Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão consiste na relação entre as componentes de seqüência negativa e as componentes de seqüência positiva. A principal causa deste desequilíbrio é a conexão de cargas monofásicas, tanto entre uma das fases e terra quanto entre duas fases. O efeito final pode ser um desequilíbrio na amplitude das tensões, um desequilíbrio no ângulo de fase ou ambos.

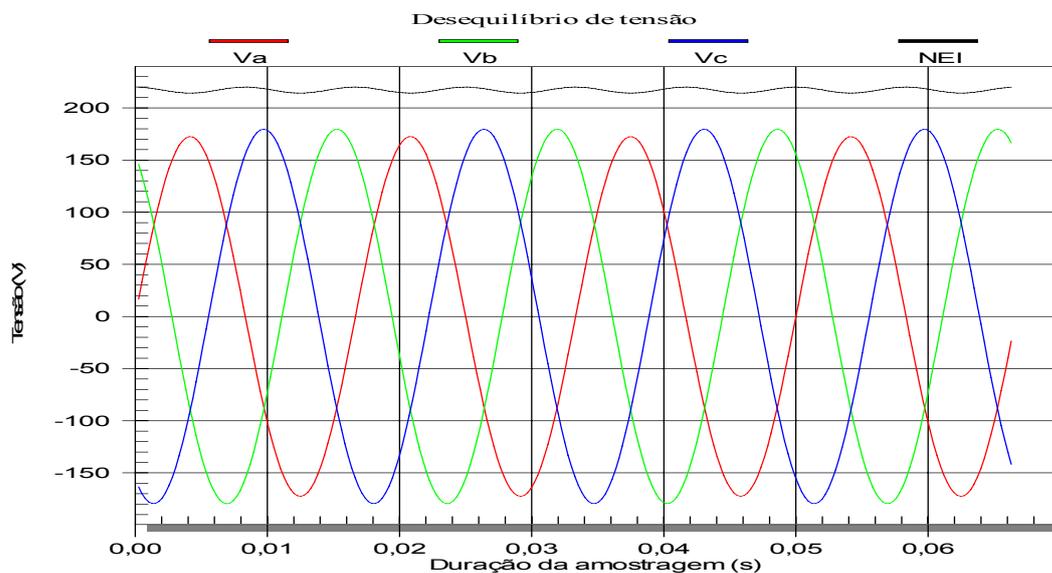


Figura 2.6 Exemplo de desequilíbrio de tensão

Na figura 2.6 são mostradas as tensões instantâneas de uma simulação de desequilíbrio de tensão, com o valor eficaz das fases B e C em 127(V) e o da fase A em 122(V).

### 2.2.7 Variações de frequência

Em grandes sistemas interligados, as variações de frequência são muito pequenas e normalmente não afetam o funcionamento de equipamentos. Alguns equipamentos antigos se baseavam na frequência da rede para medição de tempo, porém, a precisão e o baixo custo de cristais e sistemas de satélites (Global Positioning System - GPS) tornaram raro o uso da frequência do sistema elétrico como base de tempo. Sistemas isolados são mais suscetíveis a variações de frequência.

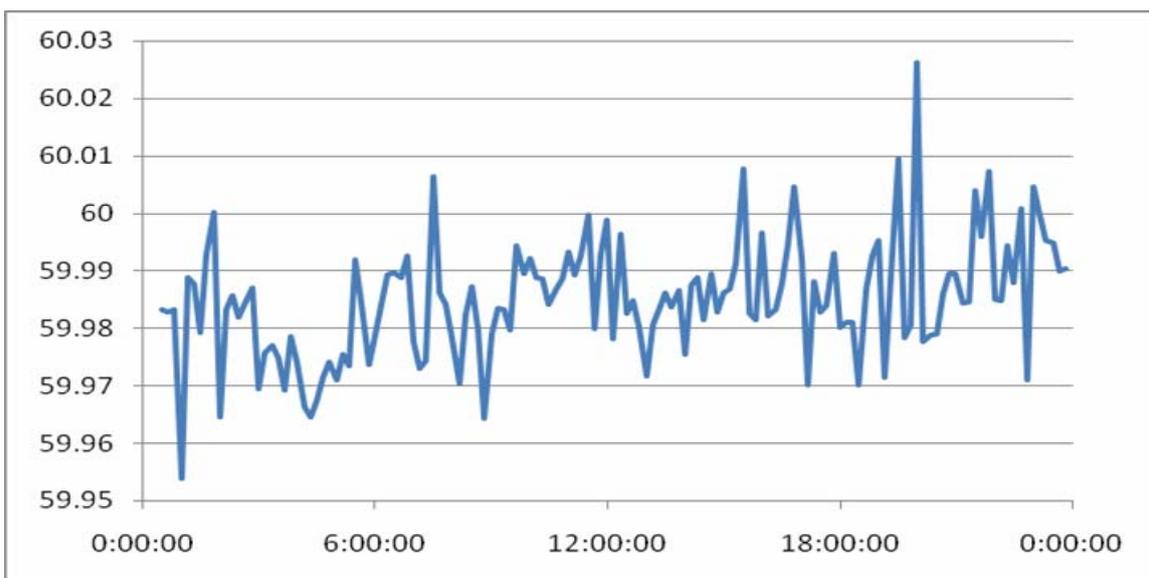


Figura 2.7 Variação da frequência da rede medida durante um dia

A Figura 2.7 mostra a variação de frequência medida durante um período de 24 horas. Foram realizadas leituras a cada dez segundos e foram calculadas as médias para agrupamento das leituras em intervalos de 10 minutos (60 leituras por ponto). A média dos pontos apresentados no gráfico é 59,985 Hz, o menor valor é 59,954 Hz e o maior valor é 60,026 Hz.

---

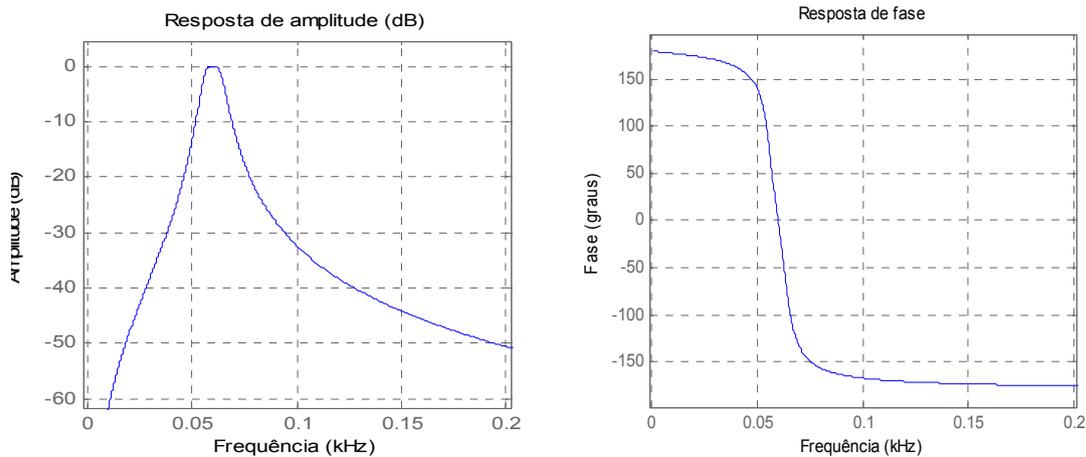
A norma IEC 61000-4-30 [8] recomenda que os medidores de qualidade de energia calculem a frequência em intervalos de 10 s. O medidor deste estudo utiliza este intervalo de tempo para cálculo de frequência e o valor está disponível para leitura como visto na figura 1.1

### **2.3 Decomposição de sinais**

Uma forma de detecção de perturbações em um sistema estável de 60 Hz é a decomposição do sinal em sua componente fundamental de 60 Hz e em uma componente residual contendo os demais componentes. Em Marafão [21], são comparados dois métodos, um primeiro com filtros passa-faixa e outro com filtro rejeita-faixa, ambos sintonizados na frequência fundamental.

O primeiro tipo, com filtro passa-faixa, permite extrair a frequência fundamental, mas introduz um erro de fase nesta faixa de frequência que piora a precisão do sinal no domínio do tempo. No segundo tipo, com filtro rejeita-faixa, esta variação de fase ocorre no sinal fundamental que é fortemente atenuado, portanto a separação da componente fundamental e da componente residual apresenta uma maior precisão no domínio do tempo.

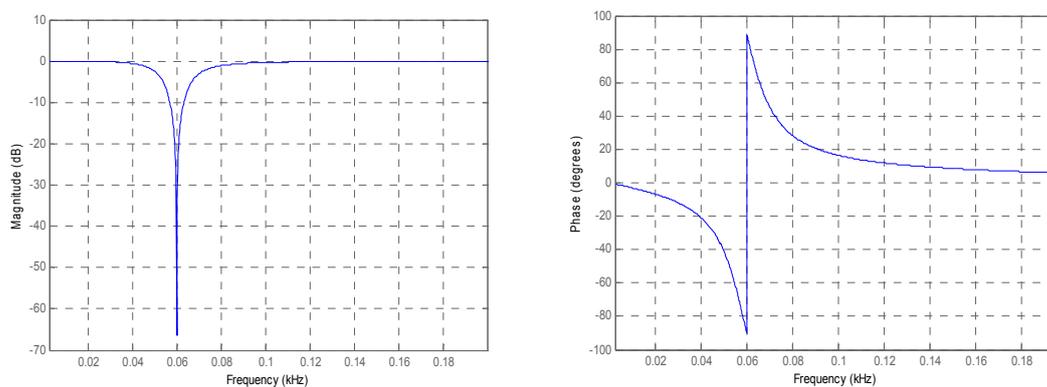
Na figura 2.8 são mostradas as respostas de um filtro passa-faixa sintonizado em 60 Hz. Pode-se observar que ocorre grande variação de resposta de fase em frequências próximas da fundamental, pequenos desvios de frequência provocam grandes variações no sinal da fundamental.



(a) Resposta de amplitude (b) Resposta de fase  
 Figura 2.8 Resposta em frequência e fase de filtro passa faixa.

O filtro foi criado utilizando a ferramenta *'fdatool'* do MatLab. Na figura 2.8(a) é mostrada a resposta de amplitude do filtro, onde nota-se grande atenuação para sinais fora da frequência de sintonia. Na figura 2.8(b) é mostrada a resposta de fase deste filtro, com grande variação de fase em torno da frequência de sintonia.

A figura 2.9 mostra as respostas de amplitude e fase, típicas de um filtro rejeita-faixa.



(a) Resposta de amplitude (b) Resposta de fase  
 Figura 2.9 Resposta em frequência e fase de filtro rejeita faixa (Notch).

Este filtro também foi criado com a ferramenta *'fdatool'* do MatLab. Na figura 2.9(a), que mostra a resposta de amplitude, é possível observar a forte atenuação para os sinais próximos de 60 Hz. A resposta de fase, na figura 2.9 (b), mostra que sinais fora da frequência de sintonia não sofrem grandes alterações.

Nas figuras 2.10 e 2.11 são mostrados os fluxos de dados para os dois métodos de decomposição.

Nos dois casos, podem ser vistos nos diagramas de fluxo de dados que o sinal passa inicialmente por um filtro passa-baixa (bloco 1) com frequência de corte igual à metade da frequência de amostragem. A função deste filtro é adequar o sinal ao teorema da amostragem de Nyquist [9]. Os filtros passa-faixa e rejeita-faixa podem ser implementados como filtros de resposta finita ao impulso (em inglês, *finite impulse response* - FIR) ou como filtros de resposta infinita ao impulso (em inglês, *infinite impulse response* - IIR), ambos capazes de realizar a tarefa de separar a componente fundamental da componente residual.

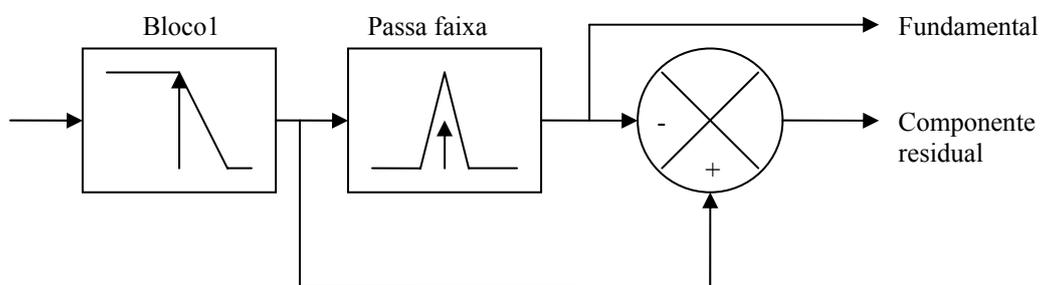


Figura 2.10 Decomposição de sinais usando filtro passa-faixa

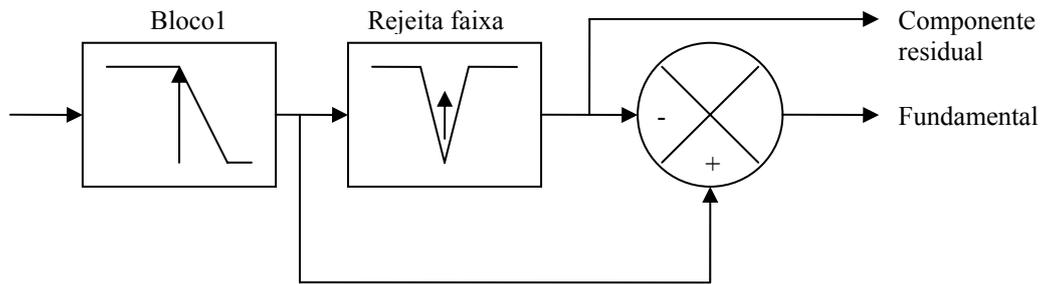


Figura 2.11 Decomposição de sinais usando filtro rejeita-faixa

A escolha do tipo de filtro a ser usado leva em conta o tempo de processamento que cada um deles requer. Smith faz em [9] uma comparação no capítulo 21 sobre os tempos de processamento dos filtros FIR e IIR com grande vantagem para os filtros IIR. Marafão [24] também faz uma comparação com o tempo de processamento de um filtro IIR que requer seis multiplicações, duas adições e duas subtrações, enquanto um filtro FIR com o mesmo desempenho requer 201 multiplicações e 200 adições.

## 2.4 Valor eficaz

O valor eficaz da tensão é o parâmetro mais usado para a detecção de eventos de qualidade de energia elétrica. Uma das definições de afundamentos e elevações de tensão é a ultrapassagem de limites considerados adequados e sua manutenção fora destes limites por um intervalo de tempo mínimo. A equação (1) mostra a forma mais simples do cálculo do valor eficaz de um sinal de tensão em um intervalo, onde  $V_k$  são as amostras do sinal e  $N$  é o número de amostras do período.

$$V = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N V_k^2}{N}} \quad (1)$$

O valor eficaz pode ser calculado a cada amostra do sinal (denominado neste trabalho como forma contínua) ou em intervalos de amostragem múltiplos de meio ciclo (denominado neste trabalho como forma discreta). Na forma contínua, também conhecida como janela deslizante, a cada amostra é realizado o cálculo com os últimos N pontos amostrados. Na forma discreta, o cálculo é realizado a cada N amostras. Nos dois casos o intervalo de tempo contendo as N amostras deve ser múltiplo de meio ciclo da frequência fundamental.

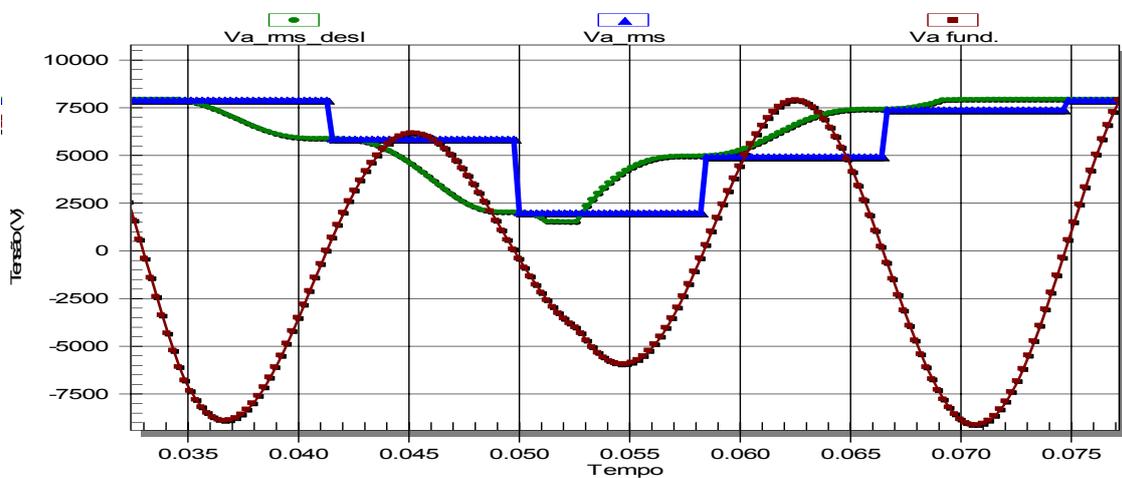


Figura 2.12 Exemplo de valores eficazes na forma discreta e na forma contínua

A Figura 2.12 mostra um sinal simulado de tensão e as duas formas de cálculo do valor eficaz. O cálculo realizado na forma contínua, representado pela curva verde, é calculado a cada amostra do sinal. Já o cálculo na forma discreta, representado pela curva azul, é feito uma única vez a cada meio ciclo.

---

No estudo apresentado por Kagan [27], foram feitas comparações entre os valores eficazes de um sinal, obtidos com janelas de dois ciclos, um ciclo e meio ciclo. A utilização de janelas de dois ciclos apresentou um desempenho inferior na detecção de variações de tensão de curta duração (VTCDs), pois sua resposta é mais lenta. Sua utilização deve ser feita apenas na detecção de eventos com duração superior a três ciclos, quando passam a ter um desempenho compatível com as janelas de um ciclo. Janelas de um ciclo são o mínimo recomendado para medidores de qualidade de energia e seu resultado é bastante próximo das janelas de meio ciclo.

A norma IEC61000-4-30 define que o valor eficaz usado para o cálculo de afundamentos e elevações de tensão deve usar janelas discretas de um ciclo atualizadas a cada meio ciclo.

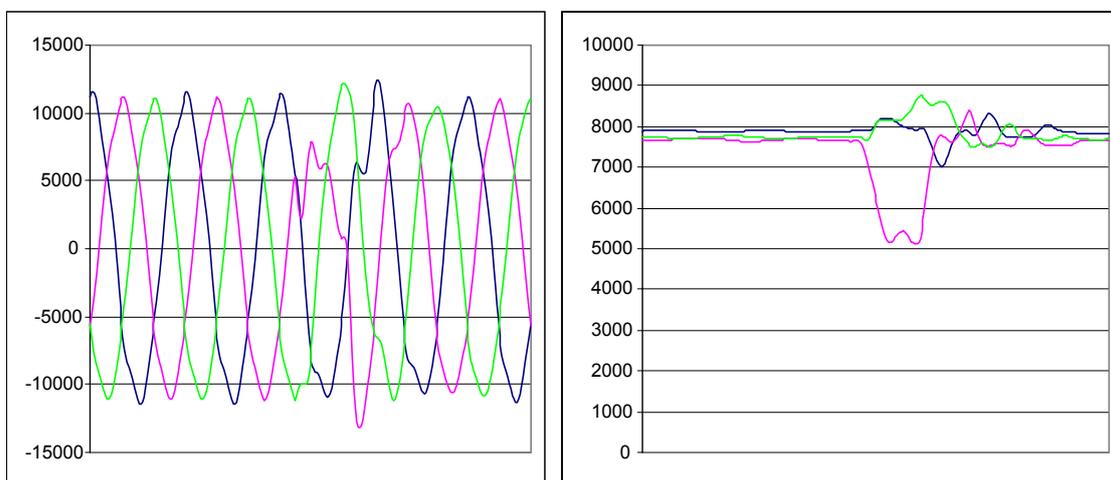
A IEC61000-4-30 também define, para um sistema trifásico, o início de um afundamento como o instante em que a tensão eficaz em uma das fases cai abaixo de um valor de referência. O retorno ocorre quando todas as fases voltam aos níveis considerados normais.

A definição análoga para o início da elevação é quando a tensão eficaz em uma das fases ultrapassa um valor de referência e o retorno ocorre quando todas as fases voltam aos níveis normais.

Dugan recomenda em [10] que, para estabelecer os índices de desempenho monofásicos, os eventos de cada fase devem ser contabilizados individualmente. Esta forma pode não ser adequada para cargas trifásicas que são afetadas como se houvesse um único evento. Neste caso, para os índices de desempenho trifásicos um único evento é contabilizado. O evento registrado

corresponde à fase que apresentar o maior desvio de tensão em relação à tensão nominal.

A figura 2.13 mostra uma leitura de tensão em um ponto da rede. Em (a) é exibida a tensão instantânea das três fases, enquanto (b) mostra o valor eficaz das mesmas tensões calculado de forma contínua. Pode-se observar pelo gráfico da tensão eficaz a ocorrência de um afundamento em uma das fases enquanto nas outras ocorre uma elevação. Este tipo de evento, comentado por Bollen [12] capítulo 7, mostra o comportamento típico de uma falta fase-terra.



(a) Tensão instantânea

(b) Tensão eficaz

Figura 2.13 Tensões instantâneas e eficazes de um evento na rede

A forma de tratamento destes múltiplos eventos depende da capacidade de processamento e armazenamento de dados do medidor. Havendo memória disponível para registro da oscilografia, qualquer evento sentido em uma das fases pode disparar o registro de um intervalo de amostras para análise posterior, não importando se o evento foi um afundamento ou uma elevação de tensão, nem a fase em que ocorreu. No caso de medidores que classificam o tipo de evento e armazenam apenas os parâmetros que caracterizam o evento, cada uma das fases deve ser tratada separadamente. A quantidade de

memória necessária para armazenamento destes parâmetros é menor que no registro de oscilografia, mas o tempo de processamento envolvido na classificação de cada evento é maior. Dados como amplitude, duração e instante da ocorrência devem ser armazenados para cada evento detectado em cada fase.

## 2.5 Norma Euclidiana Instantânea (NEI)

A NEI é apresentada por Marafão em [21] como uma das formas de decomposição de sinais no domínio do tempo. O sinal é decomposto em uma componente proporcional e uma componente ortogonal. Embora sua definição seja válida para sistemas com qualquer número de fases, restringe-se aqui a definição da NEI para um sistema trifásico.

No caso de um sistema trifásico  $[v(t)] = [v] = [v_1(t), v_2(t), v_3(t)]$ , onde  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  são as tensões das três fases e  $[i(t)] = [i] = [i_1(t), i_2(t), i_3(t)]$  onde  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$  são as correntes nas três fases, a integral (2), é definida como o produto escalar de  $[v(t)]$  por  $[i(t)]$  no intervalo  $t_1 \leq t \leq t_2$ , que representa a potência ativa. Pode-se observar em (2) que a potência ativa será nula se as funções  $v(t)$  e  $i(t)$  forem ortogonais, ou se uma delas for nula em todo o intervalo.

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [v(t)][i(t)] dt \quad (2)$$

E a integral (3)

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [v(t)]^2 dt \quad (3)$$

é definida como a norma quadrática de  $[v(t)]$  no intervalo  $t_1 \leq t \leq t_2$ . Em (3), a norma só é nula quando  $v(t)$  for nula em todo o intervalo.

Para um instante genérico de tempo  $t = t_k$ ,  $[v(t_k)] = [v] = [v_1(t_k), v_2(t_k), v_3(t_k)]$ , analisando  $[v]$  como um vetor de 3 dimensões, a NEI para os valores de  $[v]$  será:

$$\|[v]\| = \sqrt{[v][v]} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2} \quad (4)$$

Associando-se a definição da NEI (4) com a média da norma quadrática da função contínua no intervalo  $[t_k, t_k + \Delta t]$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_k}^{t_k + \Delta t} [v(t)]^2 dt = \|[v(t_k)]\|^2 = \|[v]\|^2 \quad (5)$$

A norma instantânea é

$$\|[v]\| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_k}^{t_k + \Delta t} [v(t)]^2 dt} = \|[v(t_k)]\| \quad (6)$$

As demonstrações de que a NEI pode ser usada para a decomposição dos sinais em componentes proporcionais e ortogonais são apresentadas em Marafão [21]. Em um sistema trifásico equilibrado, a NEI apresenta um sinal constante que representa a componente proporcional. Havendo desequilíbrio, a NEI apresenta variações que representam a componente ortogonal.

A figura 2.14 ilustra a NEI em dois casos de eventos em sistemas trifásicos.

Estes sinais foram medidos numa rede de distribuição de energia elétrica.

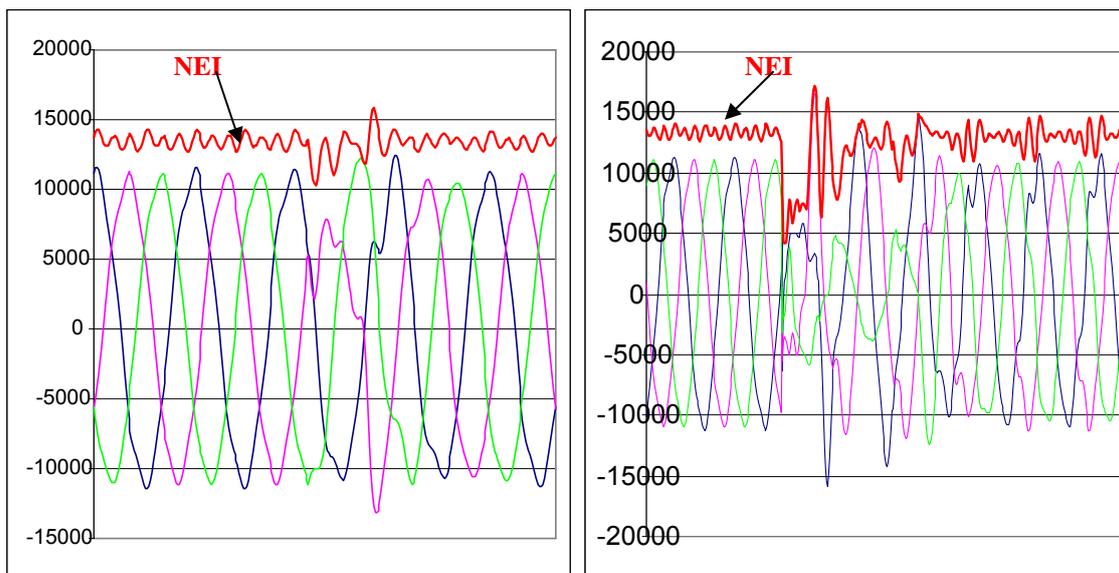


Figura 2.14 Representação da NEI em dois eventos medidos na rede.

Pode-se observar na figura 2.14 que a NEI apresenta uma pequena variação em regime permanente, provocada pela distorção harmônica presente no sinal. Durante a ocorrência dos eventos transitórios a NEI apresenta grandes variações, que podem ser usadas para detectar sua ocorrência.

## 2.6 Transformada wavelet

A transformada wavelet (TW) vem sendo usada por vários autores [13], [14], [15], [19], [20], [22], [25] para a detecção e classificação de eventos que afetam a qualidade de energia.

O método clássico de análise do espectro de frequência usando a Transformada de Fourier (TF) é adequado quando se tem sinais periódicos em regime permanente e a análise é feita no domínio da frequência. Porém, a TF se torna imprecisa quando é necessário localizar no tempo variações de frequência isoladas. O evento exibido na figura 2.1 mostra esta característica,

em que a TF é capaz de mostrar que existe uma componente fundamental predominante e um pico em torno da 15ª harmônica correspondente à frequência de oscilação do banco de capacitores, mas não existe a informação dos instantes de tempo de início e fim da oscilação.

A definição da transformada wavelet contínua é:

$$TWC_f^\psi(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{ab}(t)dt \quad (7)$$

onde:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a,b \in \mathfrak{R}; a \neq 0 \quad (8)$$

sendo  $\psi$  a wavelet mãe com seus dois parâmetros, dilatação  $a$  e translação  $b$  que variam de forma contínua. Em (7), os coeficientes  $TWC(a,b)$  representam a correlação de  $f(t)$  em relação à wavelet mãe  $\psi(t)$ .

Em (8), o fator de escala  $a$  permite analisar diferentes faixas de frequência, enquanto o fator de translação  $b$  desloca a wavelet no tempo. Pequenos valores de  $a$  correspondem a wavelets comprimidas que são adequadas para altas frequências e valores maiores de  $a$  correspondem a wavelets dilatadas, adequadas para baixas frequências. A figura 2.15 ilustra o efeito do fator de escala aplicado ao sinal analisado. Quando o fator de escala é igual a 1 não há alteração no sinal. Fazer o fator de escala igual a  $\frac{1}{2}$  equivale a dobrar a frequência do sinal analisado. E no gráfico superior, com o fator de escala igual a  $\frac{1}{4}$ , equivale a multiplicar a frequência do sinal por 4.

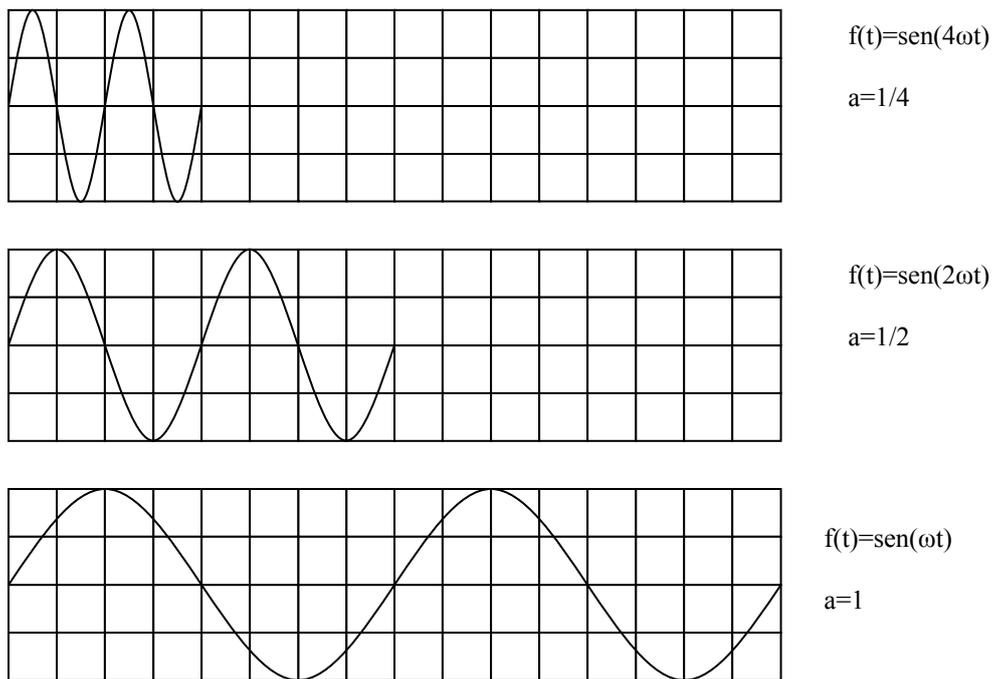


Figura 2.15 Fator de escala

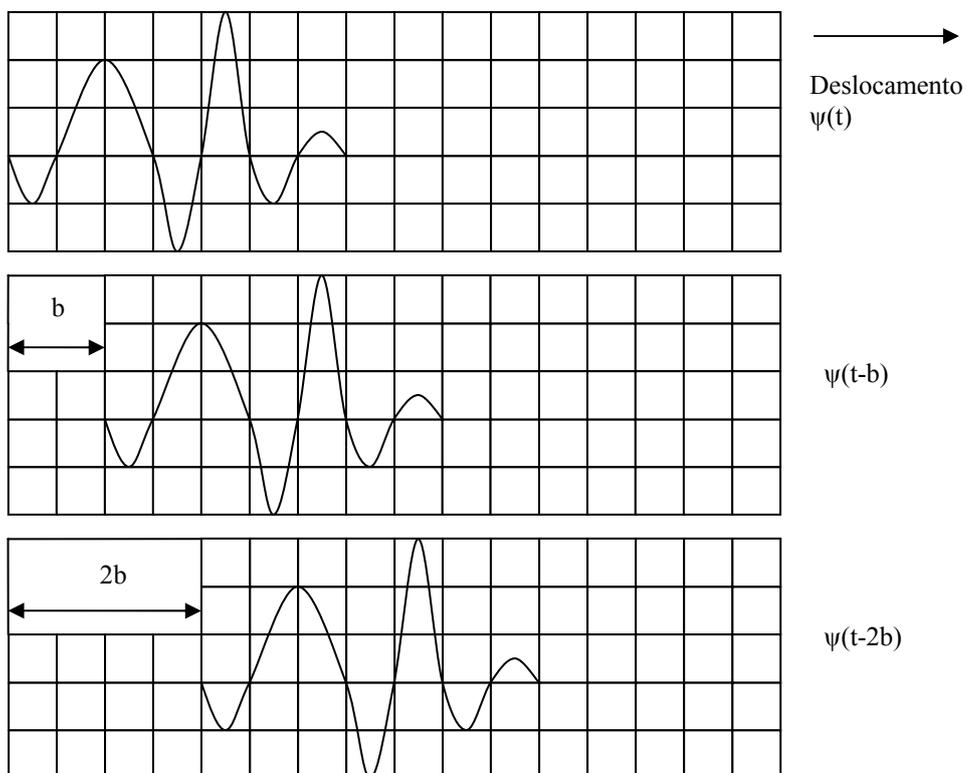


Figura 2.16 Fator de deslocamento.

O fator de translação  $b$  representa seu deslocamento no tempo. A cada deslocamento são calculados os coeficientes que relacionam a wavelet com o sinal analisado naquela janela de tempo. A figura 2.16 ilustra o fator de deslocamento da wavelet.

No gráfico superior o fator de deslocamento é igual a zero, portanto a wavelet não se desloca no tempo. Nos outros gráficos, com o fato de deslocamento igual a  $b$  e  $2b$ , a wavelet se desloca respectivamente de  $b$  e  $2b$  no tempo.

A transformada wavelet discreta (TWD), apresentada em (9), pode ser derivada da TWC, com os fatores de escala e de deslocamento transformados em números inteiros e a função  $f(t)$  discretizada para as amostras  $f(n)$ .

$$TWD_f^{\psi}(j, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^j}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n) \psi\left(\frac{n - a_0^j k b_0}{a_0^j}\right) \quad j, k, n \in \mathbb{Z}; a_0 > 1 \quad (9)$$

Transformada em sua forma mais simples (10), quando  $a_0 = 2$  e  $b_0 = 1$ , tem-se a transformada wavelet na forma diádica, que pode ser facilmente programada com bancos de filtros.

$$TWD_f^{\psi}(j, k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n) \psi\left(\frac{n - 2^j k}{2^j}\right) \quad (10)$$

A TWD utiliza filtros de decomposição dos sinais que separam os componentes de alta frequência (detalhes) e os componentes de baixa frequência (aproximações). Os filtros são chamados de “Filtro de decomposição passa-baixa” (FDPB) e “Filtro de decomposição passa-alta” (FDPA). Sucessivas aplicações dos filtros de decomposição nos coeficientes de aproximação vão separando as várias faixas de frequência e os picos de energia nos

coeficientes de detalhe localizam no tempo as ocorrências de eventos. A cada decomposição, o número de amostras resultante se reduz à metade do número de amostras do sinal anterior, tanto nos coeficientes de aproximação quanto nos coeficientes de detalhe.

Na figura 2.17 observa-se a seqüência de 3 decomposições. A cada decomposição são gerados os coeficientes de aproximação e os coeficientes de detalhes. A partir dos coeficientes de aproximação gerados, podem ser realizadas novas decomposições.

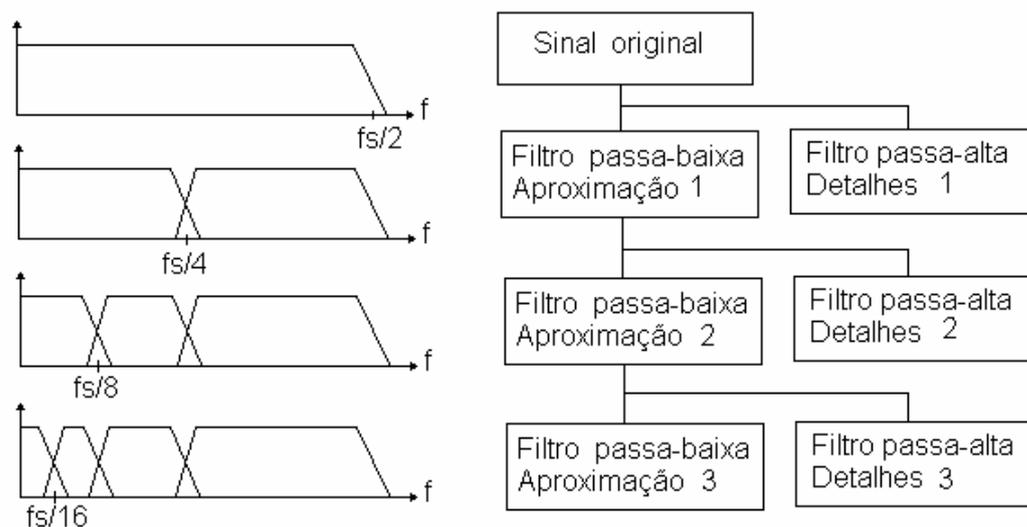


Figura 2.17 Filtros e análise multi-resolução (AMR).

Várias famílias de wavelets vêm sendo estudadas para a detecção de eventos. Como exemplo, podem ser citadas as wavelets de Haar, Daubechies, e Symlets que foram testadas por Delmont [25] frente a diversos tipos de sinais. Estudos com sinais senoidais puros, afundamentos, elevações e transitórios foram feitos com três níveis de decomposição para todas as wavelets. Delmont chega à conclusão que wavelets de ordem igual ou superior a quatro

---

apresentam melhores resultados para a detecção e localização no tempo, enquanto a wavelet de Haar é adequada para a classificação de distúrbios.

Santoso [28] afirma que o uso das Daubechies Db4, Db6, Db8 e Db10 é adequado para a detecção de vários tipos de eventos. Neste mesmo estudo Santoso afirma que eventos abruptos são mais facilmente detectados por wavelets compactas (Db4, Db6) e eventos lentos podem ser melhor analisados com wavelets mais longas (Db8, Db10).

Baseado nestes estudos, as simulações desenvolvidas neste trabalho se limitaram às wavelets de Haar, Daubechies e Symlets.

Tomando como referência o medidor usado neste estudo, com frequência de amostragem de 3900(Hz), e aplicando sucessivas decomposições, obtém-se:

1ª decomposição – coeficientes de detalhes com os sinais de 975 Hz a 1950 Hz, coeficientes de aproximação com os sinais de 0 a 975 Hz.

2ª decomposição – coeficientes de detalhes de 487,5 Hz a 975 Hz e coeficientes de aproximação de 0 a 487,5 Hz e assim sucessivamente conforme tabela 2.2.

Devido à reduzida taxa de amostragem, 65 amostras por ciclo, o medidor deste estudo limita as decomposições ao 5º nível. Os coeficientes de detalhes no 5º nível de resolução apresentam apenas duas amostras por ciclo. A partir deste nível só é possível analisar frequências abaixo da frequência fundamental, como por exemplo o sinal modulante das flutuações de tensão.

A tabela 2.2 apresenta as faixas de frequência dos sinais resultantes a cada decomposição. Pode-se observar que no quinto nível de decomposição, o limite de frequência dos filtros passa-alta e passa-baixa está muito próximo da

freqüência fundamental, que neste caso é 60 Hz. Taxas de amostragem de 32, 64, 128 e 256 amostras por ciclo são bastante comuns em medidores por facilitar o cálculo da Transformada Rápida de Fourier (FFT), porém estes valores não são adequados para a transformada wavelet. Aplicando seqüências de decomposições de transformada wavelet os limites dos filtros coincidem com a freqüência fundamental em algum ponto da série de decomposições.

Decomposição	Aproximação		Detalhes	
	De: (Hz)	Até: (Hz)	De: (Hz)	Até: (Hz)
1ª	0	975	975	1950
2ª	0	487,5	487,5	975
3ª	0	243,8	243,8	487,5
4ª	0	121,9	121,9	243,8
5ª	0	60,9	60,9	121,9

Tabela 2.2 Conteúdo de freqüência dos vários níveis de decomposição

Neste trabalho, nas simulações de detecção de eventos, foram testadas as wavelets de Haar (ou Db1), as Daubechies Db2, Db3, Db4 e Db8 e a Symlet 8. Outras wavelets podem ser utilizadas na detecção dos eventos, devendo-se observar a dimensão do filtro para não sobrecarregar o tempo de processamento do medidor. Os coeficientes dos filtros de decomposição passa-alta e passa-baixa das wavelets utilizadas neste estudo são apresentados nas tabelas 2.3 a 2.8. O *software* dos medidores pode ser implementado de forma a aceitar vários tipos de filtro. Neste caso, medidores que tenham maior capacidade de processamento poderão ser programados com filtros mais longos. Já os medidores com pouca capacidade ociosa de processamento poderão trabalhar com filtros de dimensões menores, como Haar ou Db2.

Haar (Db1)	
FDPB	FDPA
0.70710678	-0.70710678
0.70710678	0.70710678

Tabela 2.3 Filtros de decomposição - Haar

Db2	
FDPB	FDPA
-0.12940952	-0.48296291
0.22414387	0.83651630
0.83651630	-0.22414387
0.48296291	-0.12940952

Tabela 2.4 Filtros de decomposição Db2

Db3	
FDPB	FDPA
3.5226292e-2	-3.3267055e-1
-8.5441274e-2	8.0689151e-1
-1.3501102e-1	-4.5987750e-1
4.5987750e-1	-1.3501102e-1
8.0689151e-1	8.5441274e-2
3.3267055e-1	3.5226292e-2

Tabela 2.5 Filtros de decomposição Db3

Db4	
FDPB	FDPA
-1.0597402e-2	-2.3037781e-1
3.2883012e-2	7.1484657e-1
3.0841382e-2	-6.3088077e01
-1.8703481e-1	-2.7983769e-2
-2.7983769e-2	1.8703481e-1
6.3088077e01	3.0841382e-2
7.1484657e-1	-3.2883012e-2
2.3037781e-1	-1.0597402e-2

Tabela 2.6 Filtros de decomposição Db4

Db8	
FDPB	FDPA
-1.1747678e-4	-5.4415842e-2
6.7544941e-4	3.1287159e-1
-3.9174037e-4	-6.7563074e-1
-4.8703530e-3	5.8535468e-1
8.7460940e-3	1.5829105e-2
1.3981028e-2	-2.8401554e-1
-4.4088254e-2	-4.7248457e-4
-1.7369301e-2	1.2874743e-1
1.2874743e-1	1.7369301e-2
4.7248457e-4	-4.4088254e-2
-2.8401554e-1	-1.3981028e-2
-1.5829105e-2	8.7460940e-3
5.8535468e-1	4.8703530e-3
6.7563074e-1	-3.9174037e-4
3.1287159e-1	-6.7544941e-4
5.4415842e-2	-1.1747678e-4

Tabela 2.7 Filtros de decomposição Db8

Sym8	
FDPB	FDPA
-3.3824160e-3	-1.8899503e-3
-5.4213233e-4	-3.0292051e-4
3.1695088e-2	1.4952258e-2
7.6074873e-3	3.8087520e-5
-1.4329424e-1	-4.9137179e-2
-6.1273359e-2	-2.7219030e-2
4.8135965e-1	5.1945838e-2
7.7718575e-1	3.6444189e-1
3.6444189e-1	-7.7718575e-1
-5.1945838e-2	4.8135965e-1
-2.7219030e-2	6.1273359e-2
4.9137179e-2	-1.4329424e-1
3.8087520e-5	-7.6074873e-3
-1.4952258e-2	3.1695088e-2
-3.0292051e-4	5.4213233e-4
1.8899503e-3	-3.3824160e-3

Tabela 2.8 Filtros de decomposição Sym8

A figura 2.18 mostra uma simulação de transitório oscilatório, produzido pelo chaveamento de um capacitor. Este sinal será utilizado como exemplo para aplicação de uma série de decomposições de transformada wavelet.

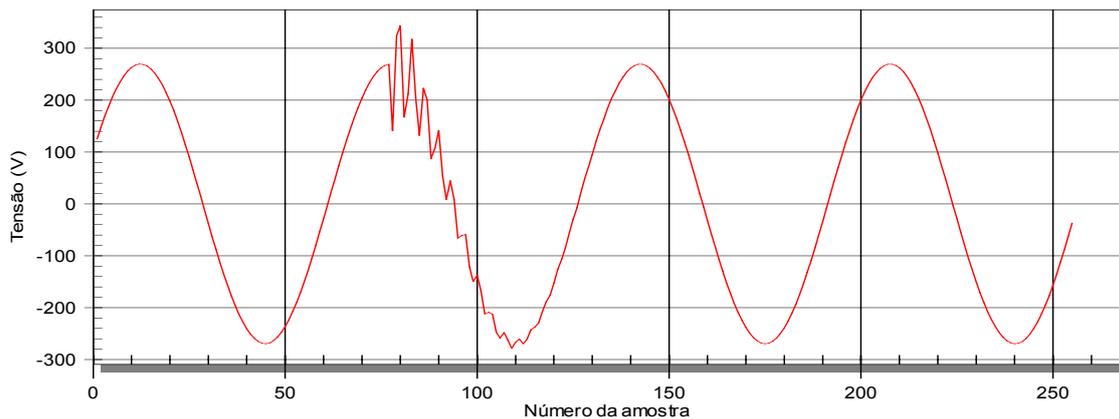
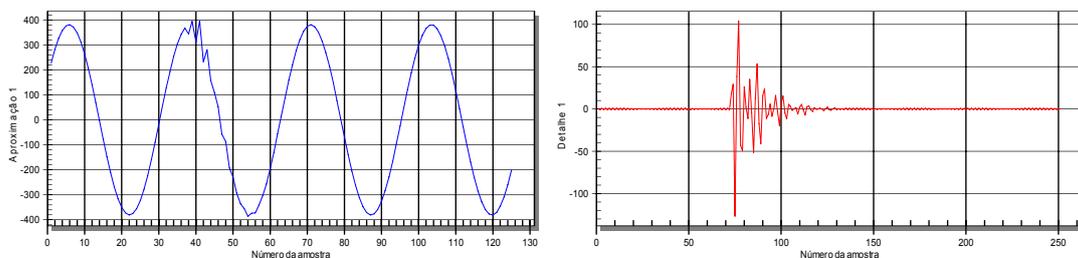


Figura 2.18 Sinal de tensão com transitório oscilatório.

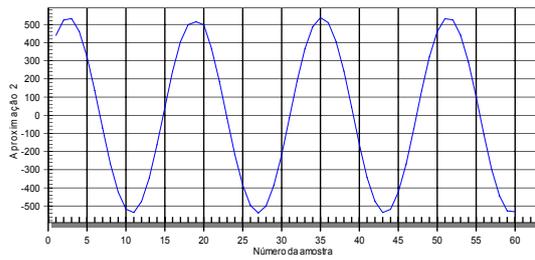
Os três primeiros níveis de decomposição usando a wavelet Daubechie 2 (Db2) podem ser vistos nas figuras 2.19, 2.20 e 2.21. Nos três casos a figura (a) mostra os coeficientes de aproximação e a figura (b) mostra os coeficientes de detalhes. Pode-se observar que logo no primeiro nível de decomposição (figura 2.19), os coeficientes de detalhes mostram de forma clara a ocorrência do evento oscilatório.



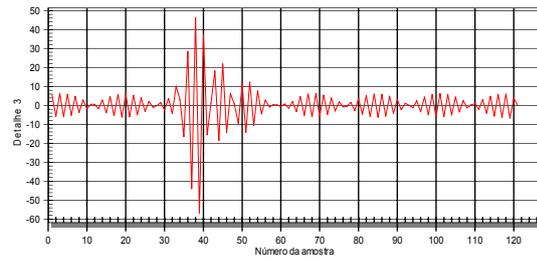
(a) Coeficientes de aproximação

(b) Coeficientes de detalhes

Figura 2.19 Primeiro nível de decomposição usando a Db2.

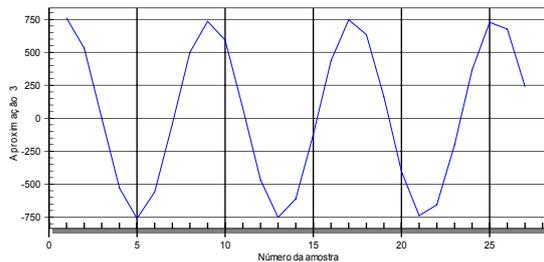


(a) Coeficientes de aproximação

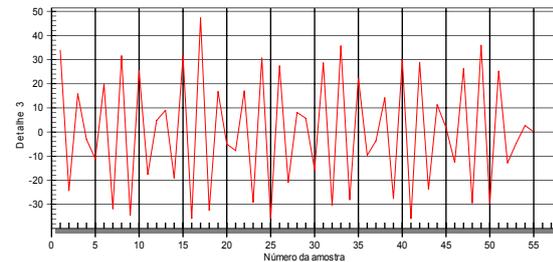


(b) Coeficientes de detalhes

Figura 2.20 Segundo nível de decomposição usando a Db2.



(a) Coeficientes de aproximação



(b) Coeficientes de detalhes

Figura 2.21 Terceiro nível de decomposição usando a Db2.

Na figura 2.20, que mostra o segundo nível de decomposição, ainda existe informação sobre o transitório nos coeficientes de detalhes em (b). A partir do terceiro nível de decomposição, mostrado na figura 2.21, já não há indicação do transitório, restando apenas as variações de regime permanente em (b).

---

## Capítulo III

### 3 Revisão Bibliográfica

Para a realização deste trabalho foram estudados diversos livros e artigos técnicos relacionados aos temas de qualidade de energia, transformada wavelet e processamento digital de sinais. Cabe ressaltar que não foram encontrados trabalhos que buscavam encontrar algoritmos de detecção de eventos para a utilização em medidores de faturamento.

Este capítulo está estruturado em uma revisão sobre processamento de sinais, Transformadas wavelet, Norma Euclidiana Instantânea e Valores eficazes.

#### 3.1 Processamento de sinais

O livro de Steven W. Smith [9] é um excelente guia sobre processamento digital de sinais. Nos capítulos iniciais são apresentadas informações importantes sobre ruídos, amostragem, conversão analógica-digital e precisão. Na seqüência, o autor apresenta capítulos sobre convolução, transformadas de Fourier e o algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT). Os filtros digitais são estudados nos capítulos seguintes que vão desde os algoritmos mais simples dos filtros de média móvel (FIR) até os filtros recursivos (IIR). No último destes capítulos é feita uma comparação entre os vários tipos e em quais situações eles são mais indicados. Um grupo de capítulos sobre aplicações mostra o uso do processamento digital de sinais em

---

processamento de áudio, processamento de imagens e compressão de dados; entre outros.

Math Bollen, em seu livro [12], faz a distinção entre variações e eventos que afetam a qualidade de energia. A estrutura do livro mostra nos dois casos sua origem, técnicas de processamento e tratamento estatístico. No caso dos eventos, que são de maior interesse neste trabalho, o capítulo 7 trata da detecção e segmentação, que seria a distinção de regiões de pré e pós evento, as regiões de transição e a região do evento. No capítulo 8 são apresentadas técnicas de caracterização dos eventos. Fica claro que as variações de amplitude de tensão podem ser usadas para caracterizar afundamentos e elevações, enquanto que os transitórios precisam passar por um processo de filtragem para separar diferentes componentes de frequência e caracterizar a amplitude e duração do transitório.

Axelberg [26] mostra um método desenvolvido para determinar a direção de propagação de flutuações de tensão (flickers) e com isso localizar se a fonte da propagação se encontra na rede ou na carga que está sendo monitorada pelo medidor. Como a fonte da flutuação produz uma modulação de amplitude tanto no sinal de tensão, como no sinal de corrente, identificar se a componente de baixa frequência está em fase na tensão e na corrente indica que a fonte da flutuação está na rede. Caso as componentes modulantes da tensão e da corrente estejam defasadas de  $180^\circ$ , isto indica que a fonte da flutuação está na carga. Axelberg cita a norma IEC 61000-4-15 que define como devem ser feitas as medidas de flutuação de tensão e utiliza o mesmo método para a medição das flutuações de corrente. Com o produto destes dois sinais é calculada a potência de flutuação (Flicker Power). O sinal positivo

---

desta potência indica que a flutuação vem da rede para a carga. Já o sinal negativo indica que a flutuação é produzida na carga e se propaga para a rede.

### 3.2 Transformada wavelet

James Walker faz uma introdução muito didática às wavelets em [11]. Partindo da wavelet de Haar, ele mostra passo a passo como é feita a decomposição do sinal nos coeficientes de aproximação e coeficientes de detalhe. Também é provado que a energia do sinal é preservada na transformação, pois é igual à soma das energias dos coeficientes de detalhe e aproximação. Nos capítulos seguintes, Walker apresenta outras famílias de wavelets e o método de cálculo para se obter os filtros de decomposição e reconstrução. Os demais capítulos do livro são voltados ao uso de wavelets para compactação de dados e processamento de imagens.

Kim e Aggarwal apresentam um tutorial, em [15] e [16], sobre o uso das wavelets em sistemas de potência. Na primeira parte é destacado que as wavelets podem ser usadas com eventos não periódicos, e é apontada uma deficiência da Transformada de Fourier que, devido a sua característica cíclica, é mais indicada para eventos estacionários. É citado pelos autores que o uso de wavelets que apresentam variações abruptas (por ex: Haar) é mais indicado para análises onde se deseja uma melhor resolução no domínio do tempo, enquanto que wavelets mais suaves (por ex: Symlet) são mais indicadas para análises com uma melhor resolução de frequência. Outro ponto muito importante deste tutorial é a explicação da transformada wavelet discreta (DWT), onde a wavelet mãe é usada como filtro de decomposição passa-baixa. Como o sinal de saída passa por uma decimação de 2 ( $2\downarrow$ ), a wavelet já está

---

automaticamente dilatada para o próximo nível de decomposição, facilitando a implementação do programa.

Na segunda parte, os autores destacam que cada nível de decomposição apresenta partes do sinal original em diferentes escalas de tempo e frequência. A análise multiresolução (AMR) permite que se tenha alta resolução no domínio do tempo, quando se analisam frequências mais altas, e alta resolução no domínio da frequência, quando se analisam frequências mais baixas. Na simulação estudada, caracterizada por uma situação de falta em uma linha de transmissão, foram usadas wavelets Daubechies 4 (Db4), biortogonal 3.1 (Bior3.1), Coiflets 4 (Coif4) e Symlets 5 (Sym5), comparando as somas dos coeficientes de detalhes da fase onde ocorreu a falta com as outras fases. O algoritmo proposto para a detecção analisa uma janela deslizante de um ciclo, e o evento é detectado quando a soma dos coeficientes ultrapassa um determinado nível.

Gaouda [14] apresenta uma proposta para detecção e classificação de eventos baseada no desvio padrão obtido em cada nível de decomposição do sinal. A detecção do evento é feita utilizando-se apenas o primeiro nível de decomposição e os demais níveis são usados para a classificação. No trabalho é apresentada uma curva com o desvio padrão em 12 níveis de decomposição. A análise mostra que alguns eventos apresentam valores mais altos de energia em altas frequências, enquanto afundamentos e elevações de tensão mostram variações nos níveis de energia próximos da frequência fundamental. Para que o sinal pudesse ser decomposto em até 12 níveis foi usada uma amostragem de 8192 Hz, sendo que os coeficientes do último nível de detalhes apresentam dados em uma faixa de 2 a 4 Hz.

---

Santoso mostra em [13] o uso da transformada de Fourier para análise de fenômenos em regime permanente e a transformada wavelet para análise de transitórios. Os parâmetros de amplitude, tensão de pico, frequência, afundamentos, estatísticas dos coeficientes de wavelets, são diferentes para cada tipo de evento e podem ser usados para identificá-los. São estudados três tipos de eventos: energização de transformadores, operação de conversores e chaveamento de capacitores usando a wavelet db4 com quatro níveis de decomposição.

A energização do transformador é detectada usando-se o primeiro nível de coeficientes de decomposição. A análise do espectro de frequência mostra um aumento nos componentes harmônicos da segunda a quinta harmônicas, destacando-se a segunda harmônica.

A operação de conversores é caracterizada pela presença de “*notches*” que ocorrem no instante de comutação. O número de *notches* por ciclo indica o tipo de conversor utilizado (6 pulsos por ciclo = conversor de 6 pulsos, 12 pulsos por ciclo = conversor de 12 pulsos). Novamente usa-se o primeiro nível de decomposição para identificar o instante de ocorrência dos *notches*. A transformada de Fourier ajuda a identificar o tipo de conversor, pois um conversor de N pulsos possui componentes harmônicos na ordem de  $(kN \pm 1)$ , onde  $k \geq 1$ .

O chaveamento de capacitores é um dos eventos mais comuns em sistemas de potência. Sua frequência de oscilação típica está entre 300 Hz e 1000 Hz e sua duração normalmente é menor que meio ciclo. Nas diferentes situações de chaveamento de capacitores, a TW é usada para identificar o início do evento. A frequência da corrente é usada como indicador de um chaveamento comum

---

(frequências mais baixas) ou de um chaveamento back-to-back (frequências mais altas). Quando ocorre o religamento do capacitor devido a um arco, após o seu desligamento, a sua identificação pode ser feita pela inversão da polaridade da tensão logo no início do evento.

### 3.3 Valores eficazes

Bollen [12] mostra que o cálculo do valor eficaz de um sinal senoidal pode ser feito em intervalos múltiplos de meio ciclo da frequência fundamental. Para a detecção de eventos de curta duração, sua sensibilidade é maior quando este intervalo é de um ou de meio ciclo. Para medições de variações de longa duração, devem ser usadas janelas de integração com duração de dez ciclos (para redes de 50Hz) ou doze ciclos (para redes de 60Hz).

Kagan et al. [27] simulam variações de tensão de curta duração (VTCDs) e utilizam diferentes protocolos de detecção para determinar sua eficiência. O primeiro grupo de simulações consiste em faltas fase-terra e fase-fase ao longo de um alimentador, variando-se aleatoriamente a distância da falta em relação à subestação, o instante de ocorrência da falta na onda de tensão e o tempo de atuação da proteção (de meio a seis ciclos). Baseado nos resultados do primeiro grupo de simulações, determinou-se a distribuição de probabilidade acumulada dos parâmetros amplitude e fase dos afundamentos de tensão para que sejam mais próximos dos eventos que podem ocorrer na prática. Esta distribuição de probabilidade foi usada para gerar os eventos do segundo grupo. Foram avaliados os protocolos descritos na tabela 3.1.

As conclusões do trabalho são que janelas de dois ciclos apresentaram piores resultados e só foram eficientes na detecção de eventos com duração superior a 3 ciclos. Janelas de meio ou um ciclo são mais adequadas para a detecção de VTCDs.

Protocolo	Duração da janela	Atualização dos valores	Início da janela
A	1 ciclo	a cada amostra	deslizante
B	1 ciclo	a cada ciclo	aleatório
C	1 ciclo	a cada ciclo	passagem por zero
D	1 ciclo	a cada $\frac{1}{2}$ ciclo	aleatório
E	$\frac{1}{2}$ ciclo	a cada amostra	deslizante
F	$\frac{1}{2}$ ciclo	A cada $\frac{1}{2}$ ciclo	aleatório
G	2 ciclos	a cada amostra	aleatório
H	2 ciclos	A cada 2 ciclos	aleatório

Tabela 3.1 Protocolos avaliados

### 3.4 Norma Euclidiana Instantânea ( NEI )

Em Marafão [21] são apresentados métodos para decomposição de sinais dos sistemas de potência, que visam separar as perturbações dos sinais padrões esperados. Ao trabalhar com os sinais de tensão e corrente, sua decomposição em sinais proporcional e ortogonal é usada para determinar a potência ativa e a potência reativa. Trabalhando apenas com o sinal de tensão, a NEI apresenta um valor constante em sistemas equilibrados. Ocorrendo desequilíbrio de amplitude ou de fase, o valor da NEI deixa de ser um sinal contínuo e passa a refletir este desequilíbrio.

Duarte [23] apresenta uma proposta de indicador de qualidade de energia, que reflete os desequilíbrios de tensão da componente fundamental e de harmônicas. O sinal de tensão é decomposto em suas componentes

fundamental (60Hz) e residual. O cálculo da NEI aplicado aos sinais decompostos é analisado para se determinar os parâmetros de qualidade. São determinados, para um ciclo da frequência fundamental os parâmetros: fator de desequilíbrio de tensão de frequência fundamental (FDu) e o fator de distorção harmônica total (FHu).

O FDu% é definido a partir dos valores máximo, mínimo e médio da NEI do sinal fundamental, como:

$$FDu(\%) = \frac{\frac{máx(nei_1) - mín(nei_1)}{2}}{méd(nei_1)} \times 100\%$$

O FHu% é definido a partir da média da NEI do sinal fundamental e dos valores instantâneos da NEI do sinal residual ( $nei_{hi}$ ), como:

$$FHu\% = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(nei_{hi})^2}}{\frac{méd(nei_1)}{\sqrt{2}}} \times 100\%$$

O parâmetro combinado de qualidade de tensão (FQu) obtido pela combinação de FDu e FHu proposto por Duarte, baseou-se no aquecimento que estes efeitos, de forma individual ou de forma combinada, provocaram nos enrolamentos de motores de indução trifásicos.

$$FQu = k_1 FDu + k_n FHu$$

---

## Capítulo IV

### 4 Metodologia utilizada para teste da detecção dos distúrbios

Para testar os conceitos teóricos de detecção de eventos e estender sua aplicação para os medidores de faturamento, foram desenvolvidos modelos de simulação capazes de gerar sinais compatíveis com aqueles encontrados em uma rede de distribuição de energia elétrica e também foram criados programas para simular o funcionamento de um medidor na identificação de eventos.

Para a simulação dos eventos procurou-se representar no ambiente do MatLab/Simulink uma rede de distribuição de 13.8 kV. No apêndice deste trabalho, a figura A.8 mostra o circuito usado nestas simulações. Nas simulações feitas sem a presença de distorção harmônica, apenas cargas lineares são conectadas à rede. Nas simulações com distorção harmônica, cargas não lineares são conectadas à rede. Os resultados das simulações foram arquivos contendo os sinais de tensão das três fases, com taxa de amostragem de 65 amostras por ciclo, compatíveis com os dados lidos pelo medidor estudado. Estes arquivos também contêm informações como o tipo de evento, sua duração, o instante de ocorrência e a fase em que o evento foi simulado.

Os programas que simulam o funcionamento do medidor lêem os arquivos gerados pelo MatLab/Simulink e processam estes sinais, procurando detectar algum tipo de evento. Comparando o resultado desta detecção com as informações do arquivo sobre o evento simulado, são contabilizados os acertos

---

ou falhas na identificação do evento para cada técnica testada. Estes dados são transformados em planilhas e tabelas que permitem a comparação da eficiência das várias técnicas utilizadas e da sua precisão na caracterização da amplitude e duração dos eventos.

#### **4.1 Processamento dos sinais para a detecção dos eventos**

Neste item são apresentados os métodos de processamento dos dados amostrados para a obtenção dos cálculos do valor eficaz, da NEI, dos sinais de decomposição fundamental e residual e da transformada wavelet. Estes métodos de cálculo são aplicados no programa que simula o funcionamento do medidor.

##### **4.1.1 Cálculo do valor eficaz**

O valor eficaz é calculado conforme recomendação da IEC 61000-4-30, com uma janela de um ciclo, atualizada a cada meio ciclo.

O módulo 8 do PRODIST [29], que trata da Qualidade de Energia Elétrica, determina que para medição de tensão em regime permanente os medidores digitais devem ter resolução mínima de 12 bits, taxa de amostragem mínima de 16 amostras por ciclo e precisão de 1% do valor da leitura. Todos estes requisitos são atendidos pelo medidor estudado e foram considerados nas simulações e nos programas de detecção utilizados neste trabalho. De acordo com a classificação do PRODIST, variações momentâneas de tensão possuem

---

duração inferior a 3 segundos. As VTCDs que este trabalho procura detectar são aquelas apresentadas na tabela 2.1 como variações instantâneas, com duração inferior a 30 ciclos.

O fluxo de dados para o cálculo do valor eficaz é apresentado na Figura 4.1. Os sinais de tensão amostrados das três fases ( $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ ) são elevados ao quadrado (produzindo os sinais  $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$  e  $V_{c2}$ ) e somados em apenas um dos dois módulos de soma. Cada módulo de soma armazena os dados de meio ciclo. A cada meio ciclo ocorre um evento de sincronismo no programa, que inicia a seguinte seqüência de cálculos:

- 1 – é calculada a média dos valores de  $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$  e  $V_{c2}$  dos dados contidos nos dois módulos de soma.
- 2 – é extraída a raiz quadrada desta média, gerando os valores eficazes.
- 3 – são descartados os dados do módulo de soma mais antigo.
- 4 – os novos dados ( $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$  e  $V_{c2}$ ) são direcionados para o módulo de soma que foi limpo.

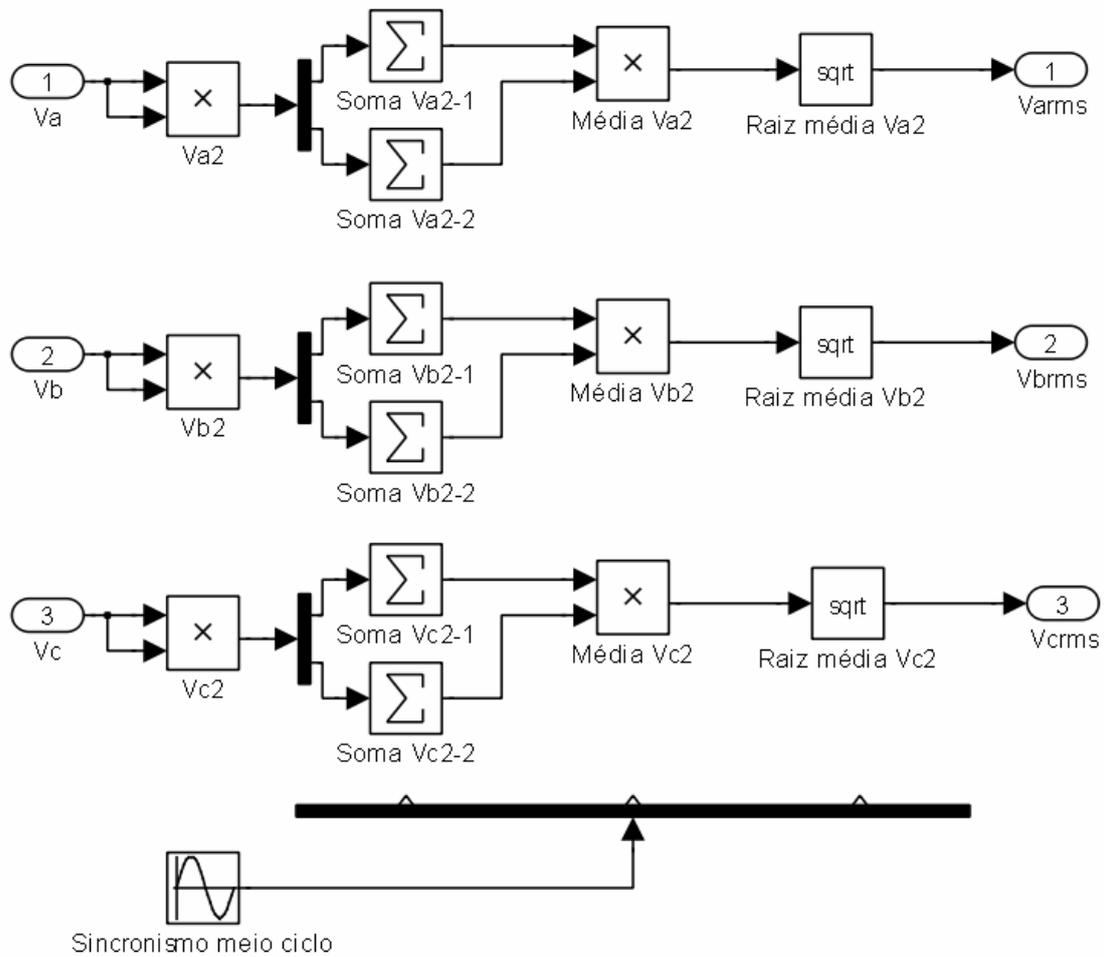


Figura 4.1 Fluxo de dados para cálculo do valor eficaz.

O impacto do cálculo do valor eficaz a cada amostragem é muito pequeno, pois só é feita uma multiplicação e uma soma para cada fase. Durante o sincronismo, que ocorre a cada meio ciclo, é necessário um pouco mais de processamento, com a divisão para o cálculo da média e a raiz para o cálculo do valor eficaz. O processador precisa ter tempo disponível para o cálculo de 360 divisões e 360 raízes a cada segundo.

#### 4.1.2 Cálculo da NEI

A geração dos dados da segunda ferramenta de análise, a NEI, pode ser feita de duas maneiras diferentes. Uma delas necessita que o processador tenha uma certa capacidade ociosa, pois precisa realizar um cálculo de raiz quadrada para cada fase a cada amostragem. A segunda forma perde um pouco da precisão ao trabalhar com valores aproximados da NEI, mas mantém a mesma capacidade de detectar os eventos.

A Figura 4.2 mostra o fluxo de dados para o cálculo da NEI. As entradas  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  são os sinais amostrados das tensões de fase. A primeira operação, que consistem em elevar cada um destes sinais ao quadrado, já é realizada para o cálculo do valor eficaz. Estes sinais,  $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$  e  $V_{c2}$ , são somados e é extraída a raiz quadrada, produzindo o sinal de saída NEI.

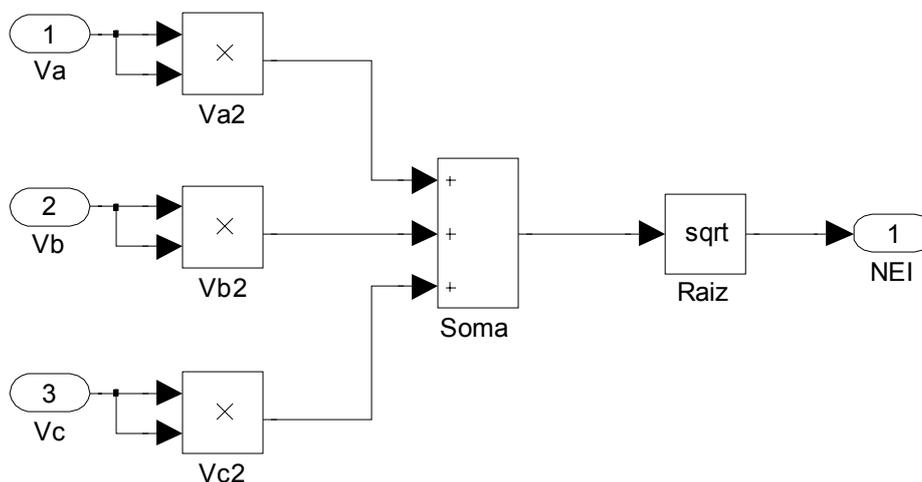


Figura 4.2 Fluxo de dados para o cálculo da NEI

O tempo de processamento necessário para este cálculo está além da capacidade de alguns medidores fabricados atualmente. A Figura 4.3 mostra uma forma simplificada que reduz este tempo de processamento. O método

consiste em dividir a soma dos quadrados pelo valor nominal da NEI. A operação de divisão não consome tanto tempo do processador quanto uma operação de raiz quadrada e permite a aplicação desta técnica em medidores mais simples.

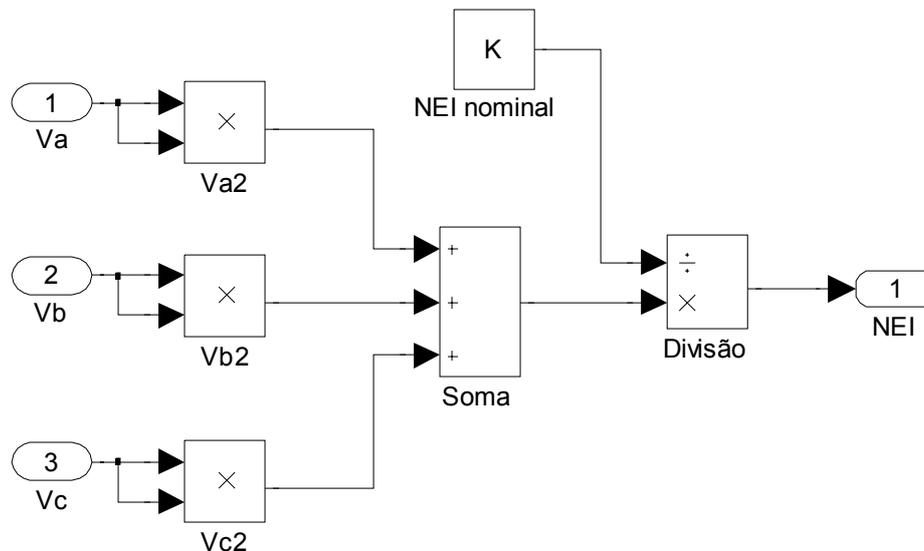


Figura 4.3 Fluxo de dados simplificado para o cálculo da NEI

#### 4.1.3 Cálculo do filtro para a decomposição de sinais

O filtro utilizado para a decomposição do sinal foi um filtro rejeita faixa de resposta infinita ao impulso. Um filtro com dois pólos, que necessita de poucos recursos de processamento, foi suficiente para isolar o sinal da componente fundamental.

O modelo clássico do filtro, conhecido como forma direta I (FD I), pode ser visto na Figura 4.4. Esta é a forma mais tradicional de se criar um filtro IIR, mas requer um pouco mais de processamento que o filtro da forma direta II (FD II). Usando a FDI um filtro de dois pólos necessita de quatro componentes de

atraso ( $z^{-1}$ ); usando a FDII são necessários apenas dois componentes de atraso.

Sua equação de saída é:

$$y(n) = b_0x(n) + b_1x(n-1) + \dots + b_Mx(n-M) - a_1y(n-1) - a_2y(n-2) - \dots - a_Ny(n-N)$$

$$y(n) = \sum_{i=0}^M b_i x(n-i) - \sum_{j=1}^N a_j y(n-j)$$

Sendo  $x(n)$  o sinal de entrada e os sinais  $x(n-M)$  os sinais de entrada atrasados de  $M$  amostras. Da mesma forma  $y(n)$  é o sinal de saída e os sinais  $y(n-N)$  são os sinais de saída atrasados de  $N$  amostras.

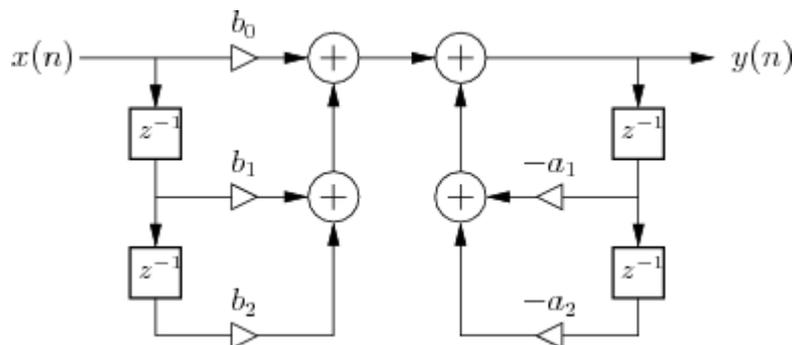


Figura 4.4 Modelo de filtro IIR na forma direta I.

Na Figura 4.5 tem-se um filtro na forma direta II de dois pólos. Este modelo também requer poucos recursos de processamento e tem a vantagem de possuir apenas dois componentes de atraso ( $z^{-1}$ ).

A equação da forma direta II para um filtro de segunda ordem fica:

$$v(n) = x(n) - a_1v(n-1) - a_2v(n-2)$$

$$y(n) = b_0v(n) + b_1v(n-1) + b_2v(n-2)$$

Nesta equação  $x(n)$  representa o sinal de entrada,  $y(n)$  o sinal de saída e os valores  $v(n)$ ,  $v(n-1)$  e  $v(n-2)$  os sinais dos nós intermediários com os respectivos atrasos (0, 1 e 2).

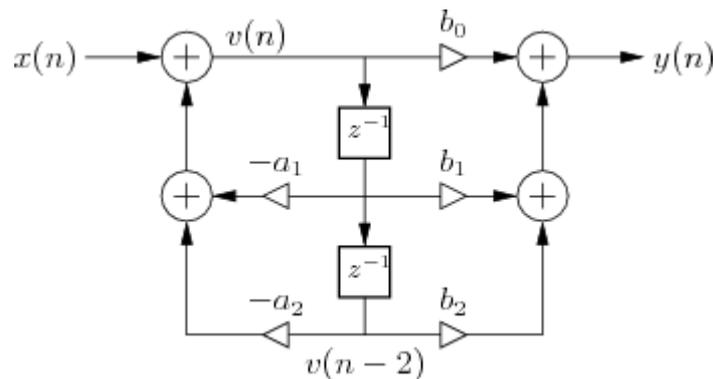


Figura 4.5 Modelo de filtro IIR na forma direta II.

#### 4.1.4 Transformada wavelet

Enquanto a técnica de decomposição de sinais vista no item anterior utiliza um filtro do tipo IIR, os filtros de decomposição da transformada wavelet são do tipo FIR. Este tipo de filtro cria o sinal de saída a partir da convolução do sinal de entrada com o núcleo do filtro. Como estão sendo extraídos os coeficientes de detalhes, são usados os coeficientes do filtro de decomposição passa-alta.

A Figura 4.6 mostra o fluxo de dados para uma fase, quando é utilizado um filtro de dimensão 2 (ex: Db1). O sinal de entrada ( $V_a$ ) passa por uma série de elementos de atraso, dependendo da dimensão do filtro utilizado (neste caso apenas um elemento de atraso). As outras entradas do sistema correspondem aos coeficientes do filtro. Como a decomposição da TW produz um sinal com metade da dimensão do sinal original, o produto dos coeficiente pelo sinal de entrada só é realizado a cada duas amostras.

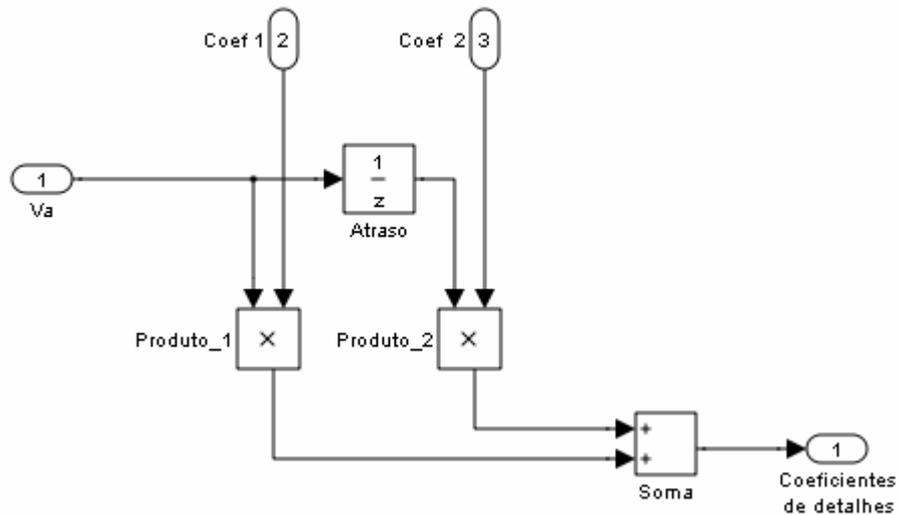


Figura 4.6 Fluxo de dados da TW com um filtro de dimensão 2

A Figura 4.7 mostra o fluxo de dados para uma fase, quando é utilizado um filtro de dimensão 4 (ex: Db2). O sinal de entrada ( $V_a$ ) passa por uma série de elementos de atraso, neste caso três elementos de atraso. As outras entradas do sistema correspondem aos quatro coeficientes do filtro. Como no exemplo apresentado na figura anterior, a cada duas amostras do sinal é realizado o produto do sinal de entrada com os coeficientes do filtro.

Para um filtro de dimensão  $N$  é necessário montar uma estrutura com  $N-1$  elementos de atraso, são realizados  $N$  produtos e  $N$  somas a cada duas amostras de sinal.

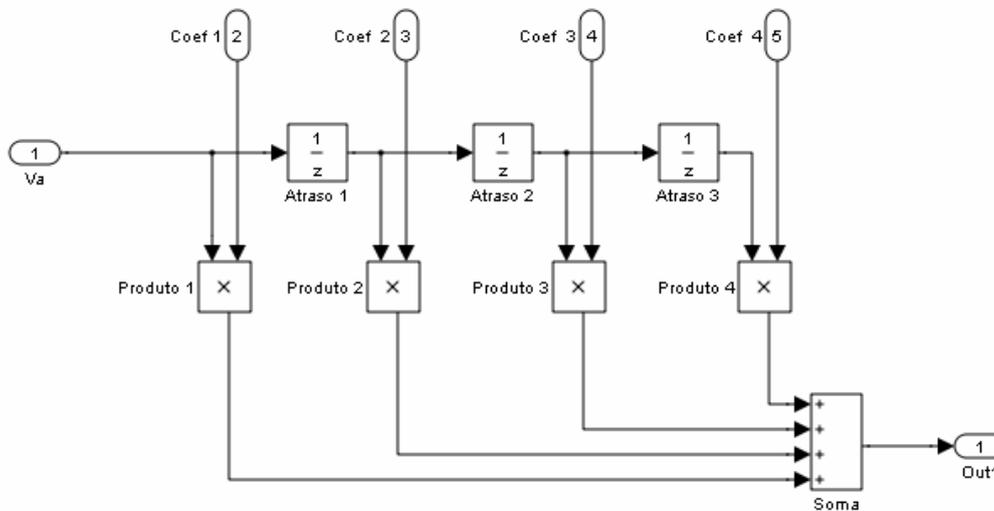


Figura 4.7 Fluxo de dados da TW com um filtro de dimensão 4

## 4.2 Eventos oscilatórios de baixa frequência

Usando o ambiente MatLab/Simulink, os eventos oscilatórios de baixa frequência foram simulados pela ligação de capacitores à rede.

Procurando variar a amplitude e a duração do evento, foram feitas diversas simulações alterando os valores do capacitor e iniciando o chaveamento em diferentes ângulos. Foram realizadas simulações com a conexão do capacitor em apenas uma fase ou com a conexão nas três fases.

Foram simulados circuitos contendo apenas cargas lineares e circuitos com retificadores que produziram distorções harmônicas na tensão da rede.

Procurou-se detectar a ocorrência das oscilações usando a decomposição dos sinais em componente fundamental e residual, a transformada wavelet e a NEI.

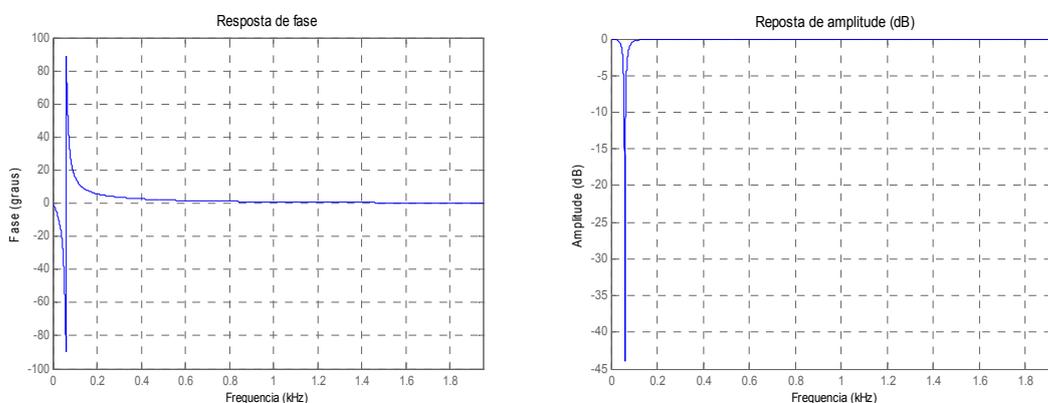
Um programa que simula o comportamento do medidor processa cada um dos arquivos gerados na simulação, detecta os eventos e gera informação sobre sua amplitude e duração. Os resultados do programa são totalizados para

verificar a quantidade de eventos detectados por meio de cada uma das técnicas aplicadas. As técnicas também são comparadas na sua precisão para detectar o instante da ocorrência do evento e na indicação da fase em que ocorreu o evento.

#### 4.2.1 Decomposição do sinal em componente fundamental e residual

A primeira técnica testada para detectar a ocorrência dos transitórios é a decomposição de sinais. O programa de detecção possui um filtro rejeita-faixa (notch) sintonizado em 60 Hz, que vai eliminar a componente fundamental deixando apenas o sinal residual para ser analisado.

O filtro rejeita-faixa utilizado na decomposição de sinais apresenta as curvas de resposta de fase e resposta de amplitude mostrados na figura 4.8. Pode-se observar em (a) que o filtro altera a fase apenas dos sinais com frequência próxima a 60 Hz. O sinal residual de interesse nesta análise praticamente não sofre variação de fase, mantendo sua precisão no domínio do tempo.



(a) Resposta de fase

(b) Resposta de amplitude

Figura 4.8 Resposta de fase e amplitude de um filtro IIR.

O detalhe da resposta de amplitude do filtro, mostrado na figura 4.9, permite observar que as pequenas variações de frequência existentes na rede elétrica não afetarão o desempenho do filtro. O filtro mantém uma atenuação melhor que -40 dB entre 59.9 Hz e 60.1 Hz.

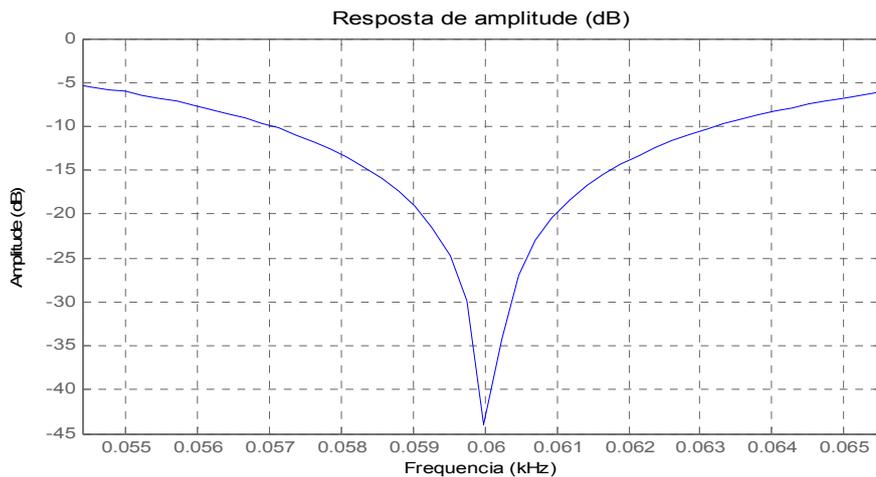


Figura 4.9 Detalhe da resposta de amplitude do filtro.

Em sistemas isolados, onde a variação de frequência é maior, torna-se necessário o projeto de vários filtros sintonizados em frequências diferentes e o medidor deve selecionar o filtro de acordo com a frequência medida.

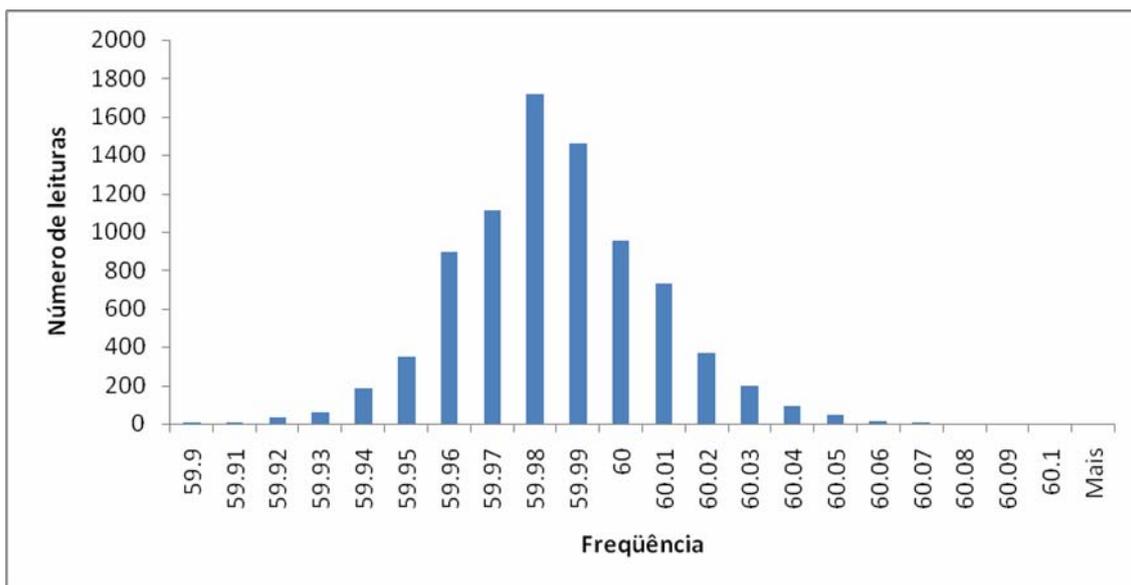


Figura 4.10 Distribuição das leituras de frequência ao longo de 24 horas

O histograma apresentado na figura 4.10 contém a distribuição das leituras de frequência da rede durante um período de 24 horas. Foram feitas leituras a cada 10 segundos. O filtro utilizado permite uma atenuação mínima de -40 dB para todos os valores de frequência obtidos neste conjunto de leituras.

Os procedimentos de distribuição da ANEEL, que estabelecem os procedimentos relativos à qualidade de energia, PRODIST – Módulo 8 [29], preconizam que, em regime permanente, a frequência da rede pode oscilar entre 59,9 e 60,1 Hz.

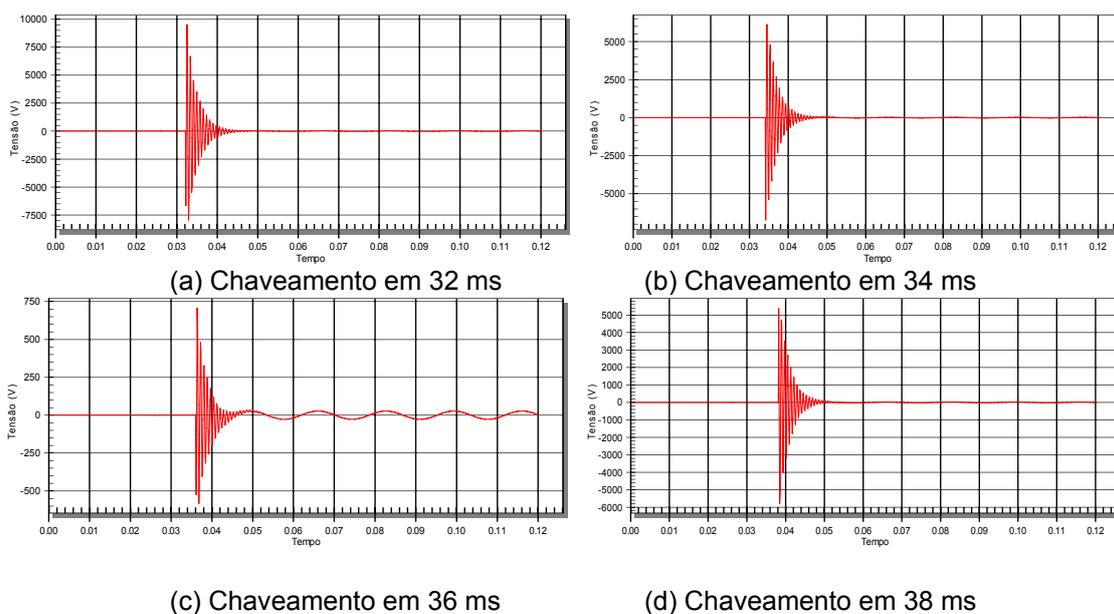


Figura 4.11 Chaveamento de capacitor ocorrendo em diferentes ângulos.

A figura 4.11 mostra quatro simulações de transitórios onde o único parâmetro que foi alterado foi o ângulo em que ocorreu o chaveamento do capacitor. Pode-se observar que a amplitude é bastante influenciada pelo instante em que se dá a conexão. A duração do evento é uma característica do circuito e não depende do instante do chaveamento; porém, como a duração é medida em relação a um determinado nível de tensão, quando a amplitude diminui, a

---

duração relativa a este nível de tensão também diminui. Esta variação da duração do evento em função do limiar de detecção é vista de forma clara na figura 4.12.

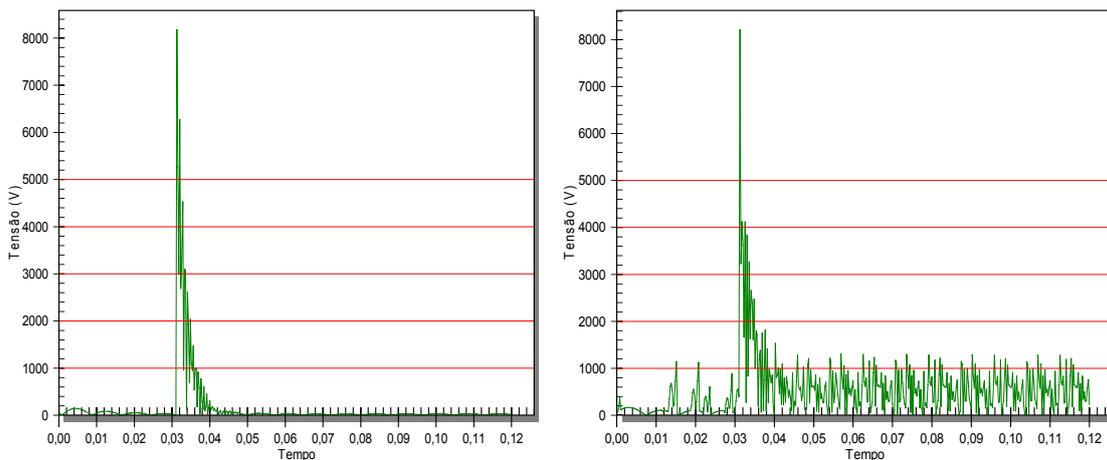
Para a caracterização de um transitório oscilatório, são usados os parâmetros do valor de pico e a duração, os mesmos parâmetros usados para os afundamentos e elevações de tensão de curta duração. A frequência do sinal residual é um parâmetro que pode ser usado, em trabalhos futuros, para a classificação do evento, por exemplo, indicando se a causa do evento foi um chaveamento de capacitores ou uma energização de transformadores. De acordo com Bollen[12], a obtenção do valor de pico pode ser feita de diversas formas:

- 1- o valor de pico da forma de onda original
- 2- o valor de pico comparado com o pico da tensão em regime permanente
- 3- o valor de pico da onda residual
- 4- o valor de pico absoluto da onda residual

Neste trabalho será considerado o valor de pico absoluto da componente residual, pois o programa de detecção fica mais simples quando são comparados apenas valores positivos.

Na figura 4.12 são exibidos os sinais residuais absolutos de dois eventos semelhantes, o evento da figura 4.12(a) ocorre em uma rede sem a presença de distorção harmônica enquanto o evento da figura 4.12(b) ocorre em uma rede com forte presença de distorção harmônica. Pode-se observar que a duração do evento é maior, quanto menor for o nível de referência adotado (representado pelas linhas horizontais vermelhas). Em uma rede com pouca distorção harmônica, como na figura 4.12(a), este nível de referência pode ser

baixo, permitindo inclusive caracterizar com precisão a duração do transitório. Em redes onde a presença de ruídos ou de distorção harmônica é elevada, o medidor deve ajustar o nível de referência para evitar que ocorram falsas indicações de eventos.



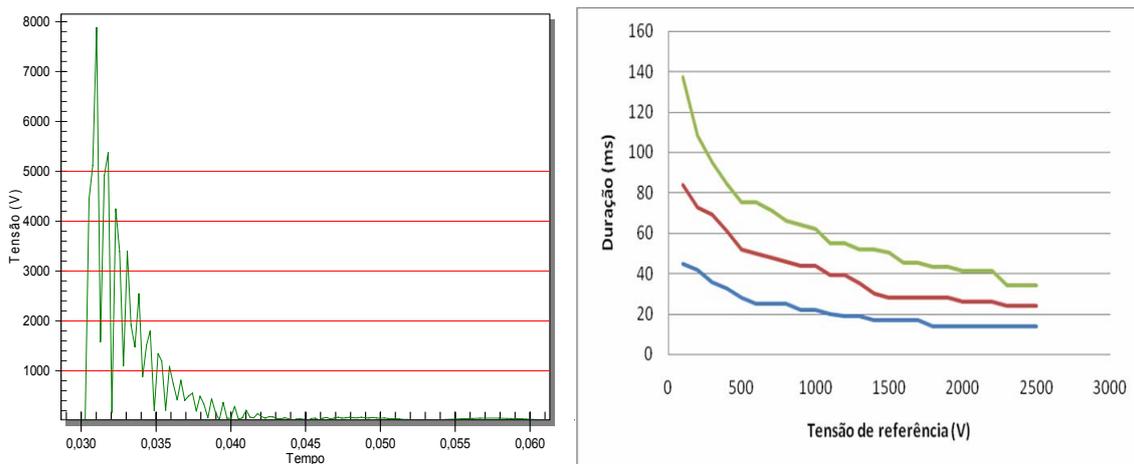
(a) Sem distorção harmônica

(b) Com distorção harmônica

Figura 4.12 Duração do evento varia com o nível de detecção utilizado.

A duração do evento será determinada pelo tempo que o sinal permanece fora dos limites estabelecidos. O programa de detecção foi testado com diferentes valores de limiar de detecção.

A figura 4.13 mostra em detalhe o sinal sem distorção harmônica da figura 4.12(a). Na figura 4.13(a) podem ser vistos os níveis de detecção em 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 V sobrepostos ao sinal residual do transitório. Na figura 4.13(b) são mostrados os resultados do tempo de duração do evento em função da tensão de detecção. São apresentados os resultados de três conjuntos de simulação, com diferentes valores de capacitor. Quanto menor o limiar de detecção, mais precisa é a indicação da duração do evento.



(a) Detalhe do evento

(b) Resultados da detecção

Figura 4.13 Duração de um transitório em função da tensão de detecção.

Os resultados dos sinais simulados são processados com diferentes valores de limiar de detecção para a detecção dos transitórios. As informações contidas na saída do programa são comparadas com os resultados teóricos esperados para se conhecer a eficiência do método.

A tabela 4.1 mostra a eficiência de detecção de um conjunto de 187 eventos simulados em cada uma das 3 fases. A eficiência de detecção foi testada com diferentes níveis de tensão. Já que estas simulações foram feitas apenas com cargas lineares, o limiar de detecção pôde apresentar níveis bastante reduzidos. Pode-se observar que com o aumento do nível de referência o índice de detecção diminui, pois alguns eventos passam a ter seu pico abaixo do nível de detecção.

Limiar de detecção	Fase A		Fase B		Fase C	
	Eventos detectados	%	Eventos detectados	%	Eventos detectados	%
200	187	100.0	187	100.0	187	100.0
300	187	100.0	187	100.0	187	100.0
400	187	100.0	187	100.0	187	100.0
500	187	100.0	187	100.0	187	100.0
600	187	100.0	186	99.4	187	100.0
700	187	100.0	185	98.9	186	99.5
800	187	100.0	184	98.4	185	98.9
900	187	100.0	183	97.9	184	98.4
1000	187	100.0	181	96.8	183	97.9
1100	187	100.0	180	96.3	181	96.8
1200	187	100.0	179	95.7	180	96.3
1300	187	100.0	176	94.1	179	95.7
1400	181	96.8	176	94.1	177	94.7
1500	179	95.7	176	94.1	176	94.1
1600	176	94.1	176	94.1	176	94.1
1700	173	92.5	176	94.1	175	93.6
1800	168	89.8	171	91.4	173	92.5
1900	165	88.2	169	90.4	171	91.4
2000	165	88.2	166	88.8	170	90.9
2100	165	88.2	163	87.2	168	89.8
2200	164	87.7	162	86.6	161	86.1

Tabela 4.1 Detecção dos eventos com diferentes valores de limiar de detecção.

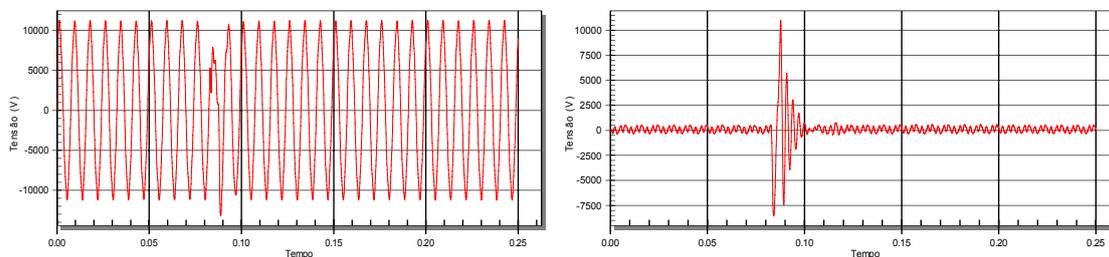
Na tabela 4.2 é repetida a mesma análise de simulações de 187 eventos em cada uma das fases. Neste caso o circuito foi simulado com a presença de cargas não lineares. Valores de limiar de detecção baixos não são capazes de detectar os eventos, pois são sobrepostos pelo sinal das componentes harmônicas. Com estes dados é possível observar que a partir de 1000 V a eficiência de detecção aumenta, mas não atinge valores elevados como na tabela 4.1. Transitórios com amplitude inferior ao nível de distorção harmônica não podem ser detectados por esta técnica.

Limiar de detecção	Fase A		Fase B		Fase C	
	Eventos detectados	%	Eventos detectados	%	Eventos detectados	%
200	0	0.0	0	0.0	0	0.0
300	0	0.0	0	0.0	0	0.0
400	0	0.0	0	0.0	0	0.0
500	0	0.0	0	0.0	0	0.0
600	0	0.0	0	0.0	0	0.0
700	0	0.0	1	0.5	1	0.5
800	6	3.2	3	1.6	3	1.6
900	168	89.8	14	7.5	79	42.2
1000	173	92.5	68	36.4	171	91.4
1100	177	94.6	71	38.0	178	95.2
1200	117	62.6	119	63.6	178	95.2
1300	138	73.8	128	68.4	130	69.5
1400	146	78.1	139	74.3	132	70.6
1500	149	79.7	142	75.9	146	78.1
1600	158	84.5	149	79.7	160	85.6
1700	161	86.1	161	86.1	161	86.1
1800	163	87.2	165	88.2	168	89.8
1900	170	90.9	172	92.0	174	93.1
2000	169	90.4	166	88.8	170	90.9
2100	166	88.8	164	87.7	168	89.8
2200	164	87.7	161	86.1	165	88.2
2300	162	86.6	158	84.5	160	85.6
2400	162	86.6	158	84.5	156	83.4
2500	162	86.6	156	83.4	153	81.8

Tabela 4.2 Detecção dos eventos com diferentes valores de limiar de detecção e presença de distorção harmônica.

Para validar estas simulações foram usados alguns exemplos de transitórios oscilatórios obtidos em uma rede de distribuição. A figura 4.14 mostra a leitura de tensão de uma fase de uma rede de distribuição. Na figura 4.14(a) pode-se observar a ocorrência um evento e na figura 4.14(b) o sinal residual deste evento, usando as técnicas de decomposição descritas. No sinal residual é possível observar sua natureza oscilatória e o decaimento exponencial característico deste tipo de evento. O programa desenvolvido foi capaz de detectar os eventos reais da rede de distribuição usados para validação. Além da detecção, o programa foi capaz de indicar corretamente a fase em que

ocorreu, sua amplitude e duração aproximada para vários valores de limiar de detecção.



(a) Sinal instantâneo

(b) Sinal residual

Figura 4.14 Transitório registrado em uma rede de distribuição e sua componente residual.

#### 4.2.2 Transformada wavelet

O conjunto de eventos simulados, descrito no início do item 4.2, foi utilizado para testar a transformada wavelet como ferramenta de detecção de transitórios oscilatórios. Como a proposta deste trabalho é identificar a ocorrência de um evento para que ele possa ser registrado por um medidor de faturamento, optou-se por utilizar apenas o primeiro nível de decomposição para detectar o evento e localizá-lo no tempo. O processamento dos demais níveis de decomposição, que pode ser usado para classificação dos eventos através da análise de multiresolução como em Santoso [13] e Gaouda [14], exige um tempo de processamento maior que pode comprometer o funcionamento do medidor.

A tabela 4.3 mostra a dimensão dos filtros de decomposição das waveletes utilizadas no programa de teste de detecção de transitórios. Como os filtros das

wavelets são do tipo FIR, para um filtro de dimensão  $N$ , a cada amostra é feita a convolução do filtro com as  $N$  últimas amostras do sinal.

Outras wavelets podem ser usadas, mas filtros maiores aumentam o tempo de processamento e podem comprometer o desempenho do medidor.

Wavelet	FDPB	FDPA
Db1 ou Haar	2	2
Db2	4	4
Db3	6	6
Db4	8	8
Db8	16	16
Sym8	16	16

Tabela 4.3 Dimensão dos filtros de decomposição de alguma wavelets

Para demonstrar o cálculo dos coeficientes de detalhes, foi simulado um transitório monofásico em uma rede de distribuição. O primeiro nível de detalhes deste sinal foi processado utilizando as transformadas wavelets Db1, Db2, Db3, Db4, Db8 e Sym8. Na figura 4.15 são vistos os coeficientes de decomposição usando as wavelets Db1 em (a) e Db2 em (b). Na figura 4.16 são utilizadas as wavelets Db3 em (a) e Db4 em (b) e finalmente na figura 4.17 são utilizadas as wavelets Db8 em (a) e Sym8 em (b).

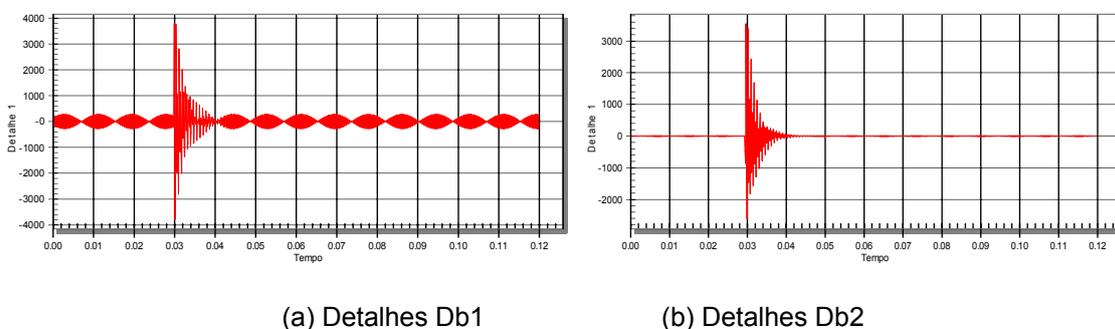
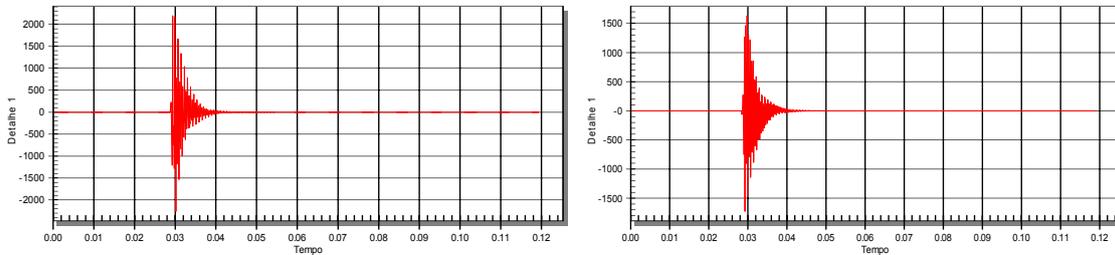


Figura 4.15 Primeiro nível de detalhes Db1 (Haar) e Db2

Em todos os coeficientes de decomposição mostrados nas figuras 4.15 a 4.17 pode-se observar claramente o pico que indica o início do transitório e no

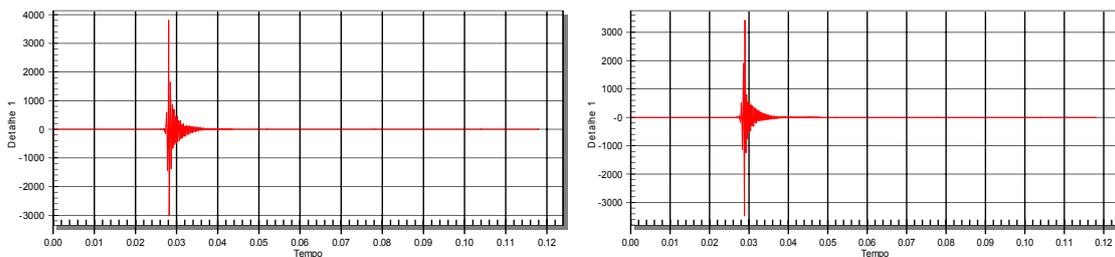
restante do sinal observa-se uma exponencial decrescente semelhante ao que foi observado na decomposição do sinal em componentes fundamental e residual.



(a) Detalhes Db3

(b) Detalhes Db4

Figura 4.16 Primeiro nível de detalhes Db3 e Db4



(a) Detalhes Db8

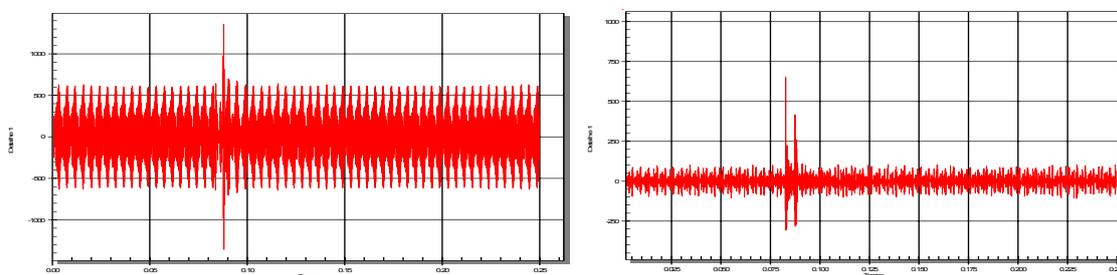
(b) Detalhes Sym8

Figura 4.17 Primeiro nível de detalhes Db8 e Sym8

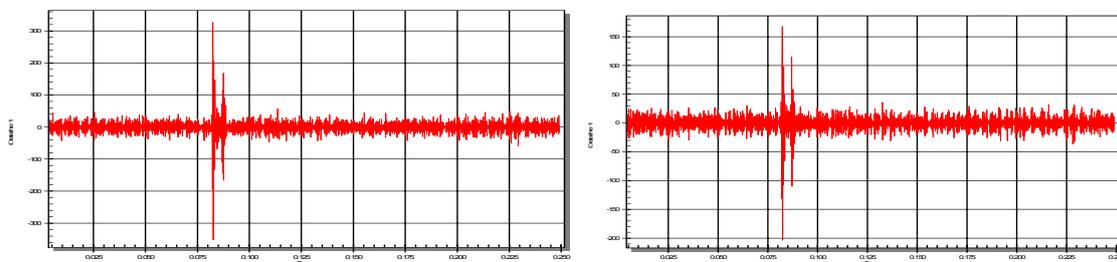
Quando os transitórios são simulados com a presença de distorção harmônica, a transformada wavelet ainda permite a detecção do início do evento, porém torna-se necessário que o nível de detecção seja alterado. Da mesma forma que ocorreu no método de detecção por decomposição do sinal, visto na figura 4.12(b), o início do evento é claramente identificado, mas o final do evento fica sobreposto pela distorção harmônica. As figuras 4.18, 4.19 e 4.20 mostram a aplicação do mesmo conjunto de wavelets, para a detecção de um transitório, na presença de um elevado nível de distorção harmônica.

Na figura 4.18 observa-se o primeiro nível de detalhes das wavelets Db1 em (a) e Db2 em (b). Os sinais produzidos pelas wavelets nesta condição de distorção

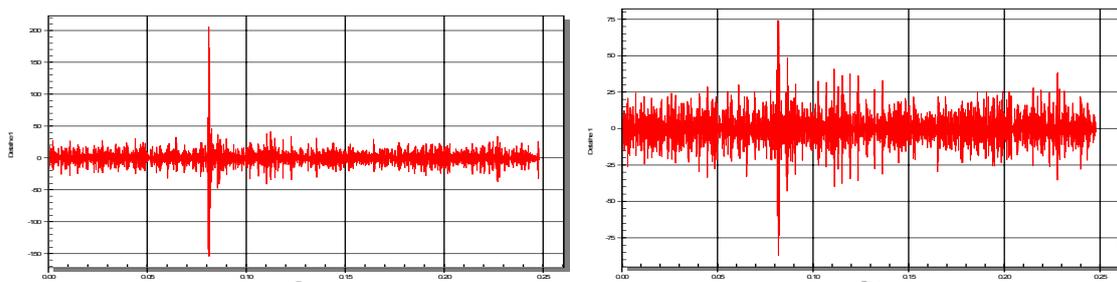
harmônica apresentam um pico indicando o início do evento, mas não apresentam as características típicas de decaimento exponencial do transitório oscilatório, vistas nas simulações sem distorção harmônica. A ausência do decaimento exponencial também é vista na figura 4.19, que contém os coeficientes de detalhes das wavelets Db3 em (a) e Db4 em (b) e na figura 4.20 que contém os coeficientes de detalhes das wavelets Db8 em (a) e Sym8 em (b).



(a) Detalhes Db1 (b) Detalhes Db2  
 Figura 4.18 Primeiro nível de detalhes Db1 e Db2



(a) Detalhes Db3 (b) Detalhes Db4  
 Figura 4.19 Primeiro nível de detalhes Db3 e Db4



(a) Detalhes Db8 (b) Detalhes Sym8  
 Figura 4.20 Primeiro nível de detalhes Db8 e Sym8

Os dados de saída do programa são utilizados para comparar a eficiência de detecção das diversas wavelets utilizadas. Os sinais são processados com diferentes valores de limiar de detecção e as informações contidas na saída do programa são comparadas com os resultados teóricos esperados para se conhecer a eficiência do método.

A tabela 4.4 compara a detecção de transitórios em ambiente sem distorção harmônica pelas wavelets Db1, Db2 e Db3. A wavelet Db1 necessita de um limiar de detecção mais alto para detecção dos transitórios. Esta característica pode ser entendida pelos coeficientes de detalhes vistos na figura 4.15 que mostra certo nível de sinal mesmo na ausência de perturbações.

Limiar de detecção	Db1		Db2		Db3	
	Fase A		Fase A		Fase A	
	Eventos detectados	%	Eventos detectados	%	Eventos detectados	%
200	0	0,0	187	100,0	187	100,0
300	0	0,0	187	100,0	187	100,0
400	0	0,0	187	100,0	187	100,0
500	0	0,0	187	100,0	186	99,5
600	0	0,0	186	99,5	182	97,3
700	0	0,0	184	98,4	177	94,7
800	177	94,6	177	94,7	174	93,1
900	187	100,0	175	93,6	172	92,0
1000	187	100,0	171	91,4	166	88,8
1100	187	100,0	169	90,4	164	87,7
1200	187	100,0	168	89,8	163	87,2
1300	187	100,0	168	89,8	161	86,1
1400	184	98,4	162	86,6	159	85,0
1500	183	97,9	160	85,6	157	84,0
1600	179	95,7	158	84,5	156	83,4
1700	174	93,1	156	83,4	155	82,9
1800	170	90,9	155	82,9	150	80,2
1900	169	90,4	155	82,9	149	79,7
2000	166	88,8	153	81,8	148	79,1
2100	165	88,2	151	80,8	140	74,9
2200	162	86,6	150	80,2	134	71,7

Tabela 4.4 Detecção utilizando as wavelets Db1, Db2 e Db3 em ambiente sem distorção harmônica

Os mesmos resultados são válidos para as outras fases, pois as diferenças encontradas entre os índices das três fases são muito pequenas. As simulações também foram feitas para as wavelets Db4 e Db8 com resultados semelhantes. A tabela 4.5 apresenta os resultados equivalentes da tabela 4.4 em ambiente com distorção harmônica. Pode-se notar que o valor do limiar de detecção para a detecção dos transitórios aumentou para todas as wavelets utilizadas. Também é possível observar que o tamanho do filtro influencia o nível de detecção. O filtro da wavelet Db2 é capaz de isolar o sinal do transitório do sinal harmônico de uma forma mais eficiente que o filtro da wavelet Db1. O filtro da wavelet Db3 também apresenta melhor resultado que o filtro da wavelet Db2.

Limiar de detecção	Db1		Db2		Db3	
	Fase A		Fase A		Fase A	
	Eventos detectados	%	Eventos detectados	%	Eventos detectados	%
200	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	36	19,3
500	0	0	42	22,5	70	37,4
600	0	0	64	34,2	101	54,0
700	0	0	112	59,9	111	59,4
800	0	0	131	70,1	126	67,4
900	0	0	143	76,5	159	85,0
1000	0	0	161	86,1	155	82,9
1100	17	9,1	171	91,4	170	90,9
1200	27	14,4	169	90,4	167	89,3
1300	88	47,1	169	90,4	160	85,6
1400	120	64,2	164	87,7	160	85,6
1500	118	63,1	161	86,1	157	84,0
1600	149	79,7	159	85,0	157	84,0
1700	174	93,1	156	83,4	153	81,8
1800	175	93,6	155	82,9	152	81,3
1900	170	90,9	154	82,4	151	80,8
2000	165	88,2	150	80,2	149	79,7
2100	163	87,2	145	77,5	143	76,5
2200	160	85,6	141	75,4	140	74,9

Tabela 4.5 Detecção utilizando as wavelets Db1, Db2 e Db3 em ambiente com distorção harmônica

Os resultados da wavelet Db8 não estão apresentados nesta tabela, mas confirmam esta tendência, com as menores tensões de referência para a detecção dos transitórios oscilatórios. Os resultados obtidos para as outras wavelets serão apresentados no capítulo 5.

#### 4.2.3 NEI para detecção de transitórios

O mesmo conjunto de transitórios simulados para análise nos itens 4.2.1 e 4.2.2 foi usado para teste da NEI como ferramenta de detecção. O uso da NEI para detecção de transitórios é semelhante à decomposição de sinais fundamental e residual. Em um sistema equilibrado e sem distorção harmônica, a NEI produz um nível contínuo. Qualquer desequilíbrio ou transitório é claramente observado como visto no sinal da figura 4.21, que representa a NEI aplicada a um transitório oscilatório simulado em uma única fase. Sua análise permite determinar o instante de ocorrência do evento e estimar sua duração, mas não permite determinar a amplitude do transitório nem a fase em que ocorreu. Como os objetivos deste trabalho são a detecção e o registro de oscilografia do evento, estas deficiências na caracterização do evento não são relevantes neste estudo.

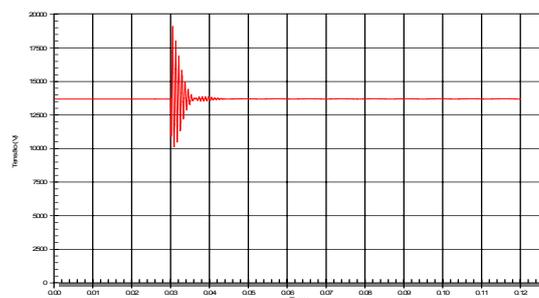
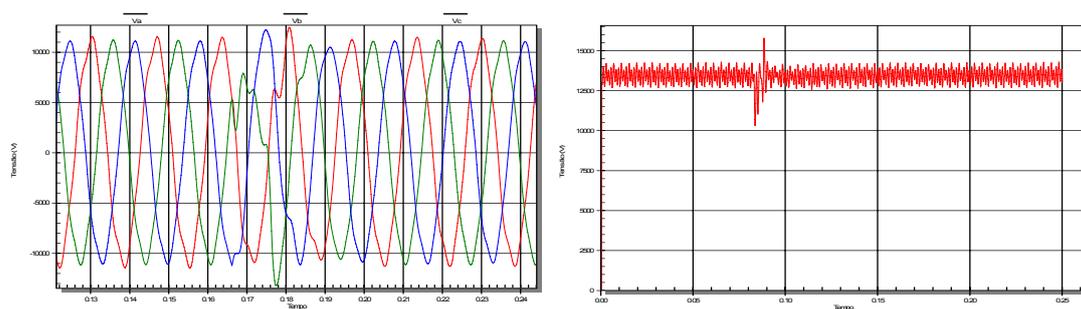


Figura 4.21 NEI aplicada a um transitório oscilatório



(a) Sinal instantâneo trifásico  
(b) NEI  
Figura 4.22 Evento ocorrendo em mais de uma fase e NEI

A figura 4.22(a) mostra um evento real ocorrido na rede de distribuição e a figura 4.22(b) apresenta a NEI aplicada a este evento. Observa-se que os níveis elevados de distorção harmônica e desequilíbrio dificultam a identificação do final do evento, esta é a mesma dificuldade encontrada com as duas técnicas anteriores. Outro fator que não estava presente nas técnicas anteriores de detecção é o fato da NEI não permitir a identificação da fase em que ocorre o evento.

Os resultados da detecção são comparados com os valores teóricos esperados, utilizando diversos valores de limiar de detecção.

A tabela 4.6 mostra a eficiência da NEI para a detecção de transitórios em ambiente sem distorção harmônica. É possível observar que com o aumento do limiar de detecção diminui-se o índice de detecção.

NEI Limiar de detecção	Fase A		Fase B		Fase C	
	Eventos detectados	%	Eventos detectados	%	Eventos detectados	%
200	187	100.0	186	99.5	186	99.5
300	187	100.0	185	98.9	186	99.5
400	185	98.9	185	98.9	185	98.9
500	185	98.9	182	97.3	182	97.3
600	183	97.9	180	96.3	182	97.3
700	182	97.3	178	95.2	180	96.3
800	178	95.2	175	93.6	177	94.7
900	178	95.2	172	92.0	175	93.6
1000	175	93.6	169	90.4	171	91.4
1100	170	90.9	169	90.4	171	91.4
1200	166	88.8	165	88.3	168	89.8
1300	161	86.1	162	86.6	167	89.3
1400	159	85.0	162	86.6	164	87.7
1500	158	84.5	159	85.0	156	83.4
1600	156	83.4	153	81.8	154	82.4
1700	155	82.9	151	80.8	153	81.8
1800	147	78.6	149	79.7	150	80.2
1900	145	77.5	148	79.1	149	79.7
2000	143	76.5	146	78.1	149	79.7
2100	140	74.9	144	77.0	147	78.6
2200	138	73.8	143	76.5	147	78.6

Tabela 4.6 Detecção de transitórios utilizando NEI sem a presença de distorção harmônica.

Na tabela 4.7, é apresentado o resultado da detecção dos transitórios oscilatórios na presença de distorção harmônica. Observa-se novamente o aumento das tensões de referência para a detecção dos eventos. O alto índice de falhas de detecção se deve ao fato de que as simulações variam o ângulo de ocorrência do chaveamento. Em determinados ângulos, a amplitude do transitório é menor que o limiar de detecção utilizado, impedindo a detecção do evento. No caso anterior, sem a presença de distorção harmônica, o índice de detecção fica próximo de 100% para alguns valores de limiar de detecção.

NEI Limiar de detecção	Fase A		Fase B		Fase C	
	Eventos detectados	%	Eventos detectados	%	Eventos detectados	%
800	0	0.0	0	0.0	0	0.0
900	0	0.0	0	0.0	0	0.0
1000	1	0.5	1	0.5	4	2.1
1100	15	8.0	19	10.2	11	5.9
1200	66	35.3	99	52.9	79	42.2
1300	110	58.8	149	79.7	139	74.3
1400	184	98.4	187	100.0	183	97.9
1500	149	79.7	159	85.0	151	80.8
1600	157	84.0	151	80.8	151	80.8
1700	149	79.7	141	75.4	143	76.5
1800	136	72.7	136	72.7	142	75.9
1900	129	69.0	123	65.8	133	71.1
2000	121	64.7	119	63.6	120	64.2
2100	112	59.9	112	59.9	113	60.4
2200	106	56.7	110	58.8	108	57.8
2300	101	54.0	105	56.2	106	56.7
2400	100	53.5	101	54.0	102	54.6
2500	99	52.9	100	53.5	100	53.5

Tabela 4.7 Detecção de transitórios utilizando NEI na presença de harmônicos.

---

### 4.3 VTCDs

Os afundamentos e elevações de tensão com duração superior a dois ciclos não apresentam dificuldades para serem detectados. Medidores de faturamento que possuem recursos para detecção e registro de VTCDs utilizam a variação do valor eficaz como método de detecção e são bastante precisos. Este estudo ficará restrito à detecção de eventos com duração inferior a dois ciclos. Serão utilizadas a NEI, a transformada wavelet e o valor eficaz como técnicas de detecção de VTCDs. A eficiência destes métodos e a quantidade de recursos de processamento que cada um deles utiliza serão comparadas para se determinar quais as técnicas mais adequadas.

Estes métodos serão comparados em sua eficiência para detectar o evento e em sua precisão para determinar a duração e a amplitude.

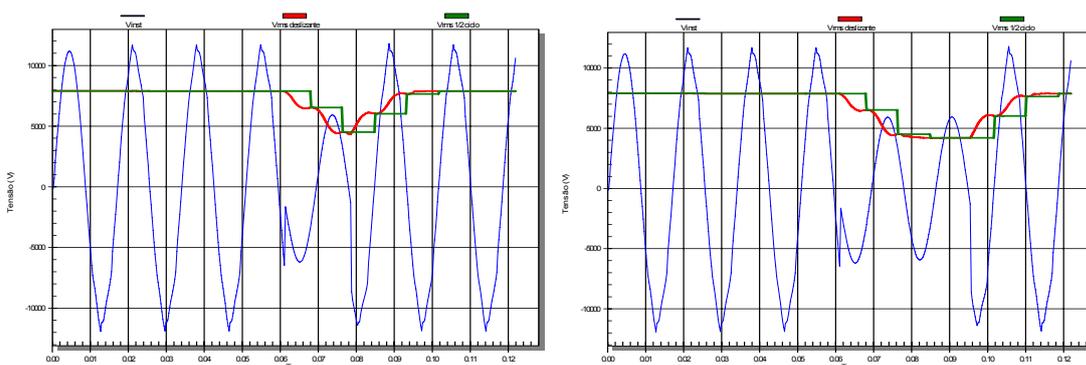
Foram simulados circuitos capazes de gerar quatro amplitudes residuais diferentes na ocorrência de uma falta. A remoção da falta no simulador é feita de modo que a duração dos eventos gerados varie de 2 a 32 ms. O instante de início dos afundamentos também foi testado nas simulações. Tomando a fase A como referência o início dos afundamentos variou de 0 a 16 ms com intervalos de 2 ms .

As elevações de tensão foram simuladas para gerar sinais com amplitudes de 115% e 125% da tensão nominal. Foram simulados vários eventos com duração de 2 a 32 ms. Da mesma forma que nos afundamentos de tensão, os instantes de início dos eventos variaram de 0 a 16 ms com intervalos de 2 ms.

As simulações de afundamentos e elevações de tensão foram realizadas em circuitos contendo apenas cargas lineares e em circuitos com cargas que provocam distorções harmônicas.

### 4.3.1 Valores eficazes

Adotou-se como referência o método recomendado pela IEC 61000-4-30 com integração de um ciclo e atualização a cada meio ciclo. Na figura 4.22 pode-se observar a diferença entre o cálculo do valor eficaz com janela deslizante, atualizado a cada amostra, e o cálculo do valor eficaz com janela discreta, atualizado a cada meio ciclo. São duas simulações de afundamento de tensão que diferem entre si apenas quanto a sua duração. A duração destes afundamentos de tensão foi de um ciclo para o evento apresentado na figura 4.23(a) e dois ciclos para evento apresentado na figura 4.23(b).



(a) Afundamento de tensão de um ciclo

(b) Afundamento de tensão de dois ciclos

Figura 4.23 Valor eficaz deslizante e discreto.

Embora a IEC61000-4-30 recomende que cada fase tenha seu sincronismo de cálculo na passagem por zero do sinal, o programa que simula o funcionamento do medidor usa apenas uma das fases como referência. Assim

---

o cálculo das três tensões eficazes é feito no mesmo instante de amostragem. Adotou-se este modelo pelo fato do medidor estudado usar este modo de sincronismo, tornando o modelo simulado mais parecido com o medidor de referência. Em uma situação normal com a presença das três fases, a fase A é adotada como referência para a medição de frequência e o sincronismo do cálculo do valor eficaz. Ocorrendo uma falta na fase A o medidor passa a usar a fase B como referência e quando as fases A e B estão desligadas esta referência passa para a fase C.

Vários valores de limiar de detecção foram usados para testar a eficiência da detecção dos VTCDs. Níveis menores que o valor considerado na tabela 2.1, de 10% da tensão nominal, foram usados para verificar a sensibilidade do programa.

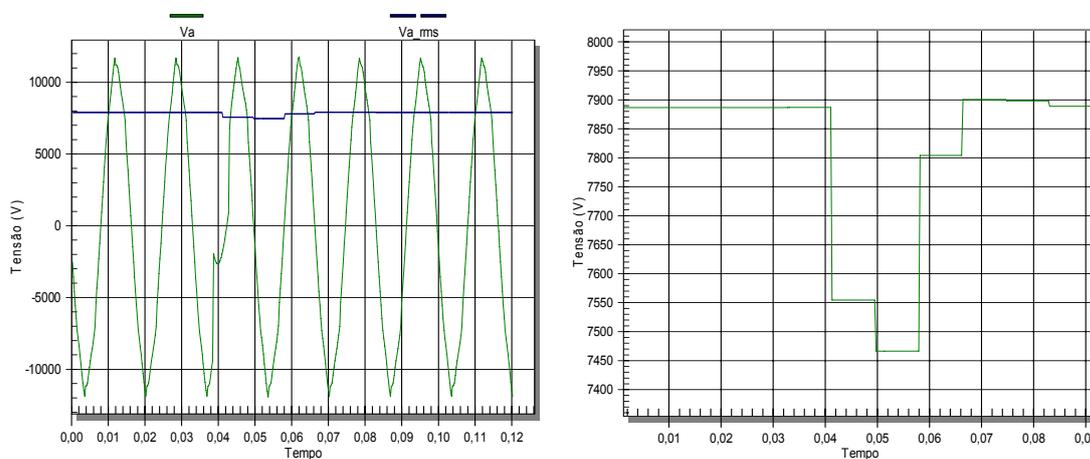
A tabela 4.8 mostra os resultados de detecção dos sinais sem a presença de distorção harmônica e dos sinais com distorção harmônica para vários valores de limiar de detecção. Os resultados, muito próximos nos dois casos, mostram que a presença de distorção harmônica em regime permanente não afeta a detecção.

Observando os dados da tabela 4.8, percebe-se que, mesmo com tensões de referência baixas, já existe certo índice de falha na detecção dos eventos. Uma análise mais detalhada dos eventos que não foram detectados mostrou que afundamentos de tensão de curta duração próximos da passagem por zero do sinal de tensão produzem alterações muito pequenas no valor da tensão eficaz. A figura 4.24 ilustra este tipo de evento, que aparentemente não é detectado pela variação do valor eficaz da tensão. Na figura 4.24(a) é mostrado a simulação de um afundamento de tensão e o seu valor eficaz. Na figura 4.24(b)

o valor eficaz deste sinal é mostrado em detalhe e sua variação foi menor que 500 V (0,063 PU ), insuficiente para caracterizar um afundamento de tensão.

	Com distorção	Sem distorção		Com distorção	Sem distorção
Limiar de detecção	%	%	Limiar de detecção	%	%
100	100.0	100.0	1300	95.4	95.4
200	100.0	100.0	1400	95.4	95.4
300	100.0	100.0	1500	94.4	94.4
400	100.0	100.0	1600	93.5	93.5
500	99.5	99.1	1700	89.8	89.8
600	98.2	97.2	1800	89.8	89.8
700	97.2	97.2	1900	88.4	88.4
800	96.8	96.8	2000	87.0	86.1
900	96.3	96.3	2100	82.4	82.4
1000	96.3	96.3	2200	81.5	80.6
1100	96.3	96.3	2300	80.6	80.6
1200	96.3	96.3	2400	78.7	78.7

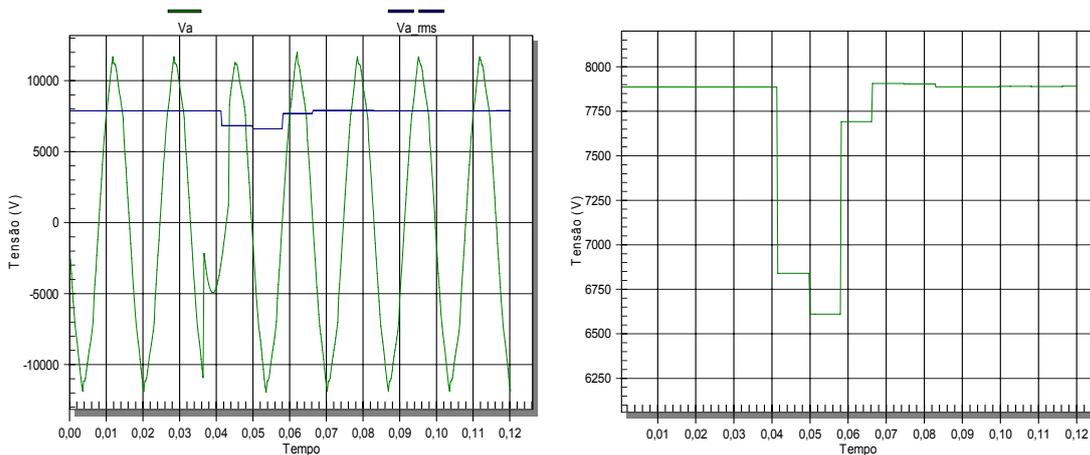
Tabela 4.8 Uso do valor eficaz para detecção de afundamentos de tensão em sinais com e sem distorção harmônica.



(a) Sinal instantâneo e valor eficaz (b) Detalhe da tensão eficaz  
 Figura 4.24 Afundamento de tensão ocorrendo próximo da passagem por zero do sinal de tensão.

Mantendo a duração do evento e mudando o instante de ocorrência, com a falta ocorrendo em um ângulo mais próximo do pico do sinal de tensão, a simulação do evento resultou no sinal da figura 4.25. A figura 4.25(a) mostra a

tensão instantânea e o valor eficaz e a figura 4.25(b) mostra em detalhe o valor da tensão eficaz, com uma variação de amplitude muito superior à encontrada na figura 4.24(b).



(a) Sinal instantâneo e valor eficaz

(b) Detalhe da tensão eficaz

Figura 4.25 Afundamento de tensão ocorrendo próximo ao pico do sinal de tensão

Nos casos simulados onde o programa de detecção não foi capaz de detectar o VTCD, verificou-se que o valor eficaz não ultrapassou o limiar de detecção utilizado.

### 4.3.2 Transformada wavelet

Enquanto o valor eficaz só permite detectar o início e o final das VTCDs na passagem por zero do sinal de tensão, a transformada wavelet pode ser usada para detectar os instantes de início e final das VTCDs, registrando de forma precisa a sua duração. Seu uso em conjunto com o cálculo do valor eficaz permite uma caracterização mais precisa dos instantes de transição e da duração do evento.

Na detecção de transitórios e de VTCDs com o cálculo do valor eficaz, o programa simulador procura o instante em que o sinal ultrapassa o limiar de detecção e o instante em que o sinal volta ao nível normal. Na detecção de VTCDs com a transformada wavelet, o programa procura identificar a ultrapassagem do limiar de detecção no início e no final do evento.

A figura 4.26 apresenta o primeiro nível de detalhes da transformada wavelet de um afundamento de tensão. Em todos os quatro gráficos é possível observar os picos que ocorrem no início e no final do evento. Foram usadas as wavelets Haar em (a), Db2 em (b), Db3 em (c) e Db4 em (d) para gerar estes quatro coeficientes de detalhes.

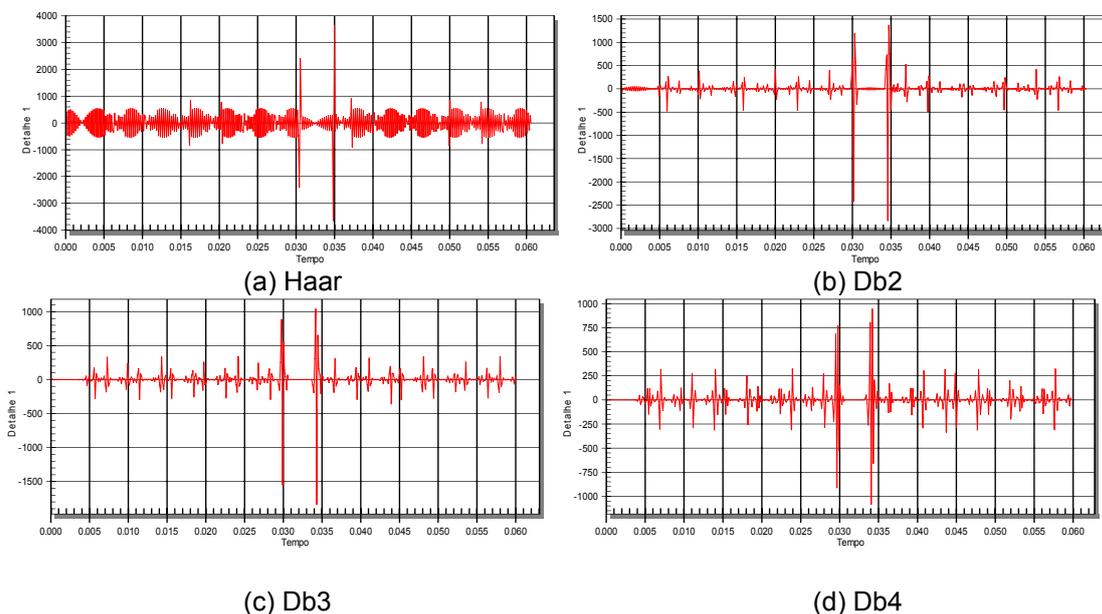


Figura 4.26 Primeiro nível de detalhes de um afundamento de tensão

A figura 4.27 mostra o primeiro nível de detalhes da transformada wavelet de uma elevação de tensão. Nos dois gráficos é possível observar os picos que indicam o início e o final do evento. O gráfico da figura 4.27(a) foi gerado pela wavelet Db2 e o gráfico da figura 4.27(b) foi gerado pela wavelet Db8.

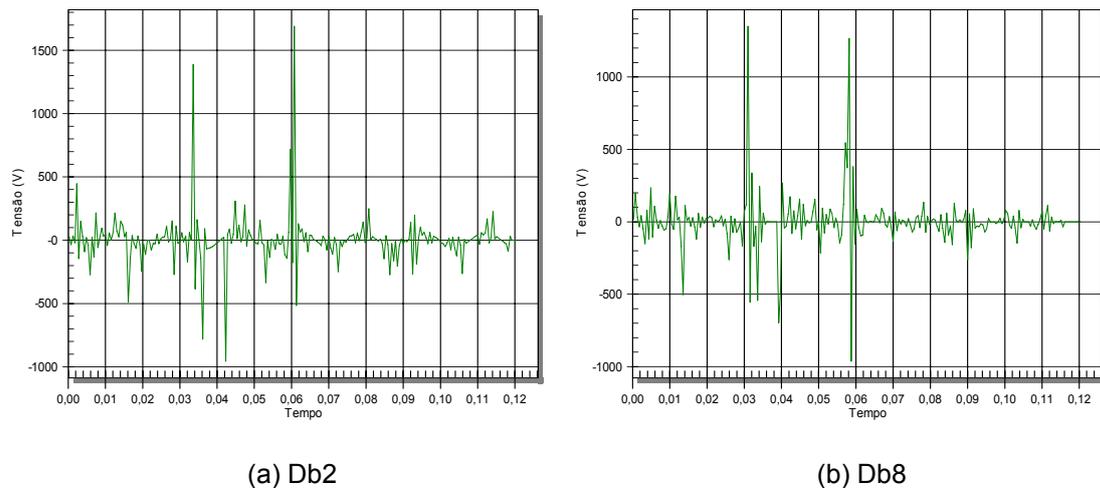


Figura 4.27 Primeiro nível de detalhes de uma elevação de tensão

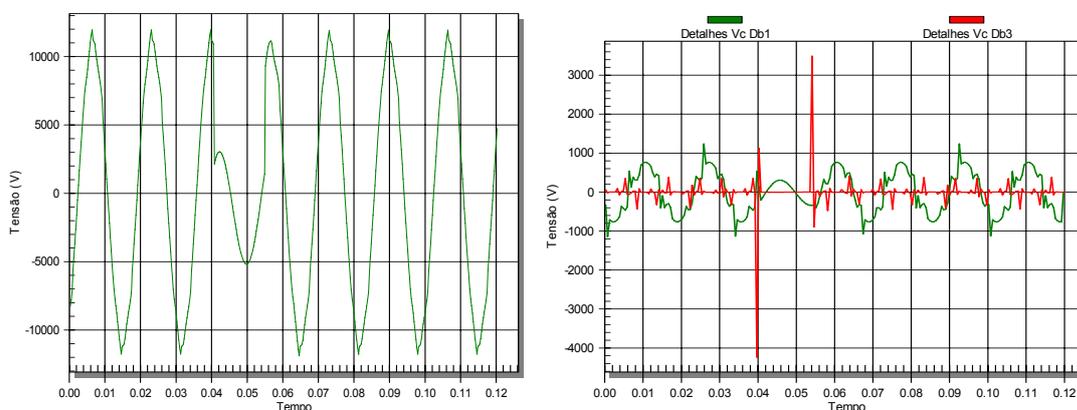
Utilizando apenas os coeficientes de detalhes do primeiro nível de decomposição, como proposto para este trabalho, não é possível identificar se o evento é um afundamento ou uma elevação de tensão.

A tabela 4.9 mostra os resultados de detecção dos afundamentos da fase C, compilados a partir dos resultados de saída do programa que simula o funcionamento do medidor. O primeiro ponto importante que pode ser observado é que em alguns casos o índice de detecção é maior que 100%. Isto ocorreu quando afundamentos de tensão nas outras fases provocaram alterações na fase C, que puderam ser detectadas pela transformada wavelet. Variações abruptas no sinal de tensão podem produzir picos nos coeficientes de detalhes semelhantes aos picos produzidos pelas VTCDs. Outro ponto importante visto na tabela é a ineficiência da wavelet Db1 para detecção das VTCDs. O comportamento da wavelet Db1 que produz este resultado pode ser visto na figura 4.28.

	Db1	Db2	Db3	Db4	Db8
Limiar de detecção	%	%	%	%	%
1500	113,9	111,1	102,8	99,5	100,0
1600	88,4	100,0	100,0	91,2	100,0
1700	72,7	100,0	100,0	90,3	100,0
1800	72,7	100,0	100,0	86,1	95,8
1900	72,7	100,0	100,0	83,3	93,5
2000	72,7	100,0	99,5	76,4	87,0
2100	72,7	100,0	99,1	70,8	81,5
2200	72,7	100,0	99,1	66,2	76,4
2300	72,7	100,0	90,7	66,2	73,2
2400	72,7	95,8	90,7	66,2	71,8
2500	72,7	95,8	87,0	66,2	65,7

Tabela 4.9 Índices de detecção de VTCDs utilizando a transformada wavelet,

Na figura 4.28(b) são comparados os resultados obtidos com o uso das wavelets Db1 e Db3 na detecção de um afundamento de tensão. Enquanto a wavelet Db3 (em vermelho) produz os picos esperados, indicadores do início e do final do evento, a wavelet Db1 (em verde) produz picos de amplitude inferior ao limiar de detecção e próximos aos valores apresentados em regime permanente.



(a) Sinal instantâneo

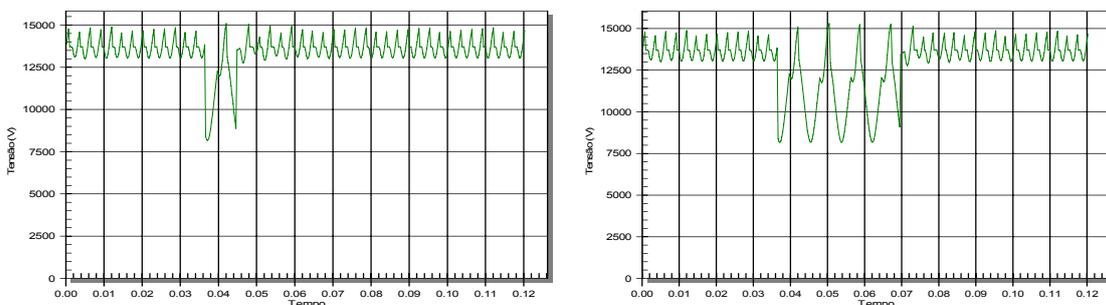
(b) Detalhes Db1 e Db3

Figura 4.28 Afundamento de tensão não detectado pela wavelet Db1 e detectado pela wavelet Db3

### 4.3.3 NEI

A detecção de VTCDs utilizando a NEI procura localizar os instantes em que a NEI ultrapassa o limiar de detecção e retorna aos limites adequados. Quando ocorrem afundamentos ou elevações de tensão monofásicos, o valor da NEI volta ao nível normal a cada meio ciclo, com a passagem por zero da fase afetada. O programa de detecção não pode registrar o final do evento neste instante, mas deve aguardar um tempo mínimo dentro dos limites adequados para sinalizar este ponto como o final do evento. O uso da NEI permite a detecção das VTCDs, mas as fases que estão envolvidas no evento não podem ser identificadas.

A figura 4.29 mostra dois gráficos da NEI em eventos de afundamento de tensão com diferentes durações. Assim como na detecção do afundamento de tensão pela variação do valor eficaz, a ocorrência de valores abaixo de um limiar de detecção indicam o afundamento de tensão. Deve ser observado que em afundamentos de tensão monofásicos, o valor da NEI retorna aos níveis normais a cada meio ciclo, como visto na figura 4.29(b), que representa um afundamento com duração maior que um ciclo. A figura 4.29(a) mostra um afundamento monofásico com duração aproximada de meio ciclo.

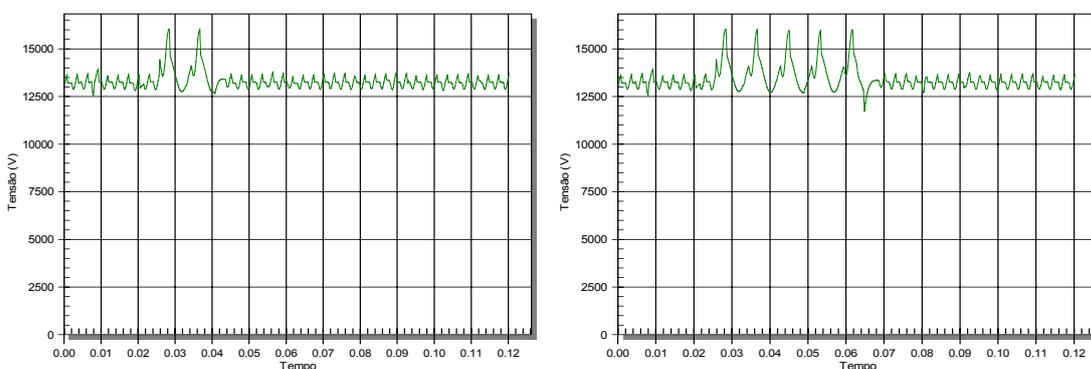


(a) Afundamento de meio ciclo

(b) Afundamento de dois ciclos

Figura 4.29 NEI detectando afundamentos de tensão de diferentes durações

Da mesma forma, a figura 4.30 mostra dois gráficos da NEI em eventos de elevação de tensão. Neste caso, a detecção da elevação é feita quando os valores da NEI ultrapassam o limiar de detecção. Deve ser observado que assim como nos afundamentos de tensão monofásicos, nas elevações de tensão monofásicas o valor da NEI retorna aos níveis normais antes do final do evento. Na figura 4.30(a), uma elevação de tensão com duração de um ciclo, a NEI apresenta dois pulsos. Na figura 4.30(b), com duração de dois ciclos e meio, a NEI apresenta cinco pulsos.

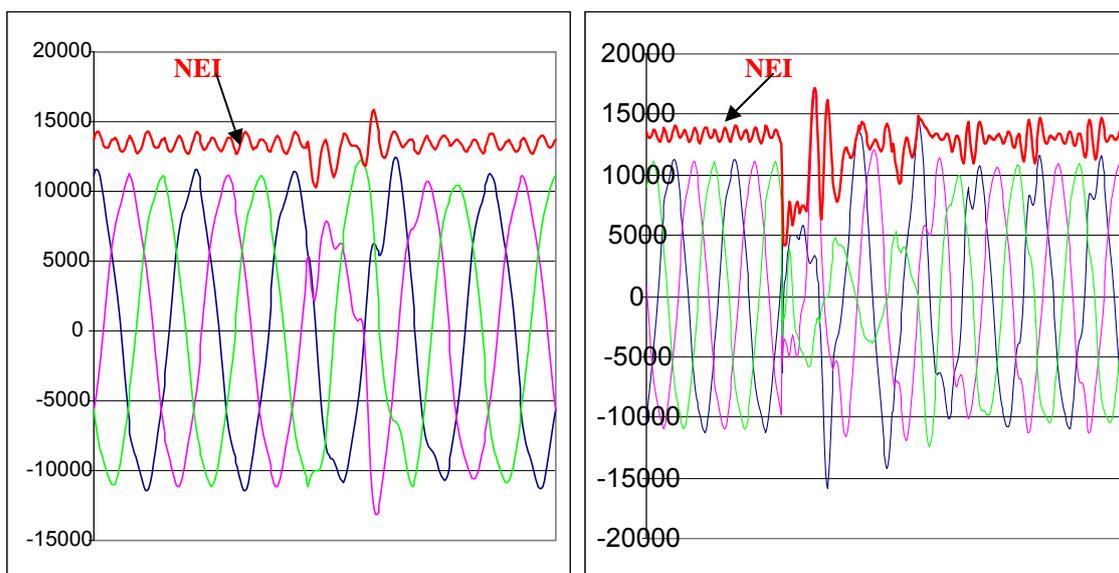


(a) Elevação de um ciclo

(b) Elevação de dois ciclos e meio

Figura 4.30 NEI detectando elevações de tensão de diferentes durações

A figura 4.31, que já foi mostrada anteriormente (figura 2.12), mostra o comportamento da NEI na ocorrência de eventos múltiplos. Os eventos apresentados nos dois gráficos são leituras registradas em uma rede de distribuição de energia elétrica. Pode-se observar afundamentos de tensão seguidos de elevações de tensão nas fases. O comportamento da NEI reflete a ocorrência destes eventos, ficando abaixo do limiar de detecção de afundamentos de tensão e em seguida ultrapassando o limiar de detecção de elevações de tensão.



(a)

(b)

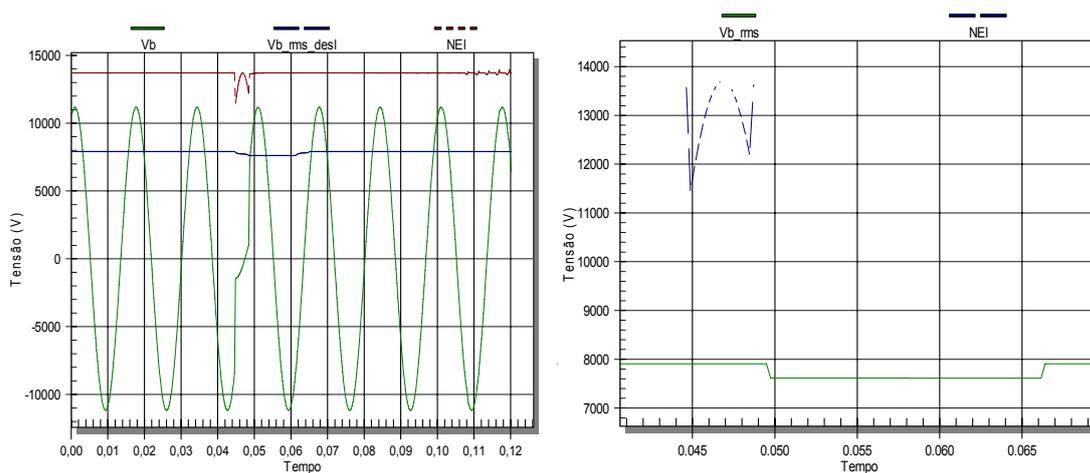
#### 4.31 NEI em eventos múltiplos

A sensibilidade da NEI para detectar afundamentos e elevações de tensão fica clara na tabela 4.10. Foi observado um alto índice de detecção, mesmo com tensões de referência elevadas. Os valores do limiar de detecção precisaram ser ajustados para detectar os mesmos eventos que são detectados pela variação do valor eficaz. A presença de distorção harmônica não afetou de forma significativa os resultados da detecção.

Os dados de saída do programa que simula o funcionamento do medidor para a detecção dos eventos permitem identificar os casos onde duas técnicas apresentam resultados divergentes. Em alguns casos, como visto anteriormente na figura 4.24, VTCDs que não foram consideradas como afundamentos de tensão pela variação do valor eficaz foram detectadas pela NEI.

	Sem distorção	Com distorção
Limiar de detecção	%	%
200,00	100,0	100,0
400,00	100,0	100,0
600,00	100,0	100,0
800,00	100,0	100,0
1000,00	99,7	100,0
1200,00	99,7	99,7
1400,00	99,7	99,7
1600,00	99,7	99,7
1800,00	99,7	99,7
2000,00	99,7	99,7
2200,00	99,1	99,7
2400,00	99,1	99,1
2600,00	99,1	99,1
2800,00	94,9	98,5
3000,00	92,6	94,3

Tabela 4.10 Eficiência da NEI para detecção de VTCDs



(a) Afundamento de tensão de pequena amplitude (b) Detalhe da NEI e do valor eficaz  
 Figura 4.32 Comparação da NEI e valor eficaz na detecção de afundamento

Na figura 4.32 é mostrada uma simulação de afundamento de tensão na fase B com duração inferior a meio ciclo que, de forma correta, não é detectada pela

---

variação do valor eficaz, pois não cai abaixo de 90% da tensão nominal. A NEI é capaz de detectar este leve afundamento com um limiar de detecção de 2000 V. Na figura 4.32(a) são mostrados o valor eficaz e a NEI de um afundamento de tensão. A figura 4.32(b) mostra uma ampliação destes sinais, onde pode ser observada uma variação do valor eficaz de apenas 500 V (0,063 PU) e uma variação da NEI superior a 2000 V (0,145 PU).

Outro ponto que pode ser observado na figura 4.32(b) é a diferença da precisão na indicação do início do evento, apresentada pelos dois métodos. Pode-se observar um afundamento da NEI ocorrendo no mesmo instante da VTCD. Já o valor eficaz, que é sincronizado com passagem por zero da fase de referência, apresenta neste caso um erro de um quarto de ciclo na indicação do instante de ocorrência do evento.

---

## Capítulo V

### 5 Resultados de aplicação

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na detecção dos eventos e são comparadas as diversas técnicas quanto à eficiência de detecção, quanto ao tempo de processamento utilizado e quanto à quantidade de memória necessária.

#### 5.1 Tempo de processamento dos sinais e memória necessária

A decomposição dos sinais em componente fundamental e residual utiliza um filtro IIR de segunda ordem que exige pouco processamento a cada amostra do sinal, portanto é um método bastante compacto e compatível com medidores que possuam pouco tempo ocioso de processamento.

A transformada wavelet também é um filtro, mas da forma FIR, onde a cada amostra do sinal é feita uma convolução dos últimos N pontos amostrados com os N pontos do núcleo do filtro. Portanto uma wavelet do tipo Db4 que possui um filtro de dimensão 8, fará uma convolução destes 8 coeficientes do filtro com os 8 últimos sinais amostrados. Já a wavelet Db1 (Haar) possui um filtro de dimensão 2 e a cada amostra é feita a convolução destes dois coeficientes com os dois últimos sinais amostrados. Dependendo da disponibilidade de recurso do processador do medidor, pode-se escolher uma wavelet que possa ser calculada sem prejudicar o funcionamento do medidor.

---

O processamento da NEI é o método de detecção que utiliza mais recursos do processador, pois a cada amostra do sinal é necessário um cálculo de raiz quadrada. Métodos alternativos, como não extrair a raiz quadrada ou dividir o valor da soma dos quadrados pelo valor nominal da NEI, podem ser utilizados para reduzir o tempo de processamento.

O cálculo do valor eficaz não interfere no tempo de processamento dos medidores, pois são rotinas de cálculo que já existem nestes equipamentos. Algumas adaptações, como ajustar o tamanho da janela onde é feito o cálculo ou o sincronismo de cada uma das fases, podem ser feitas para adequar os medidores às normas de qualidade de energia elétrica.

A memória necessária para a instalação destes recursos nos medidores de faturamento é de algumas centenas de bytes. Os programas são bastante compactos e podem ser adaptados para medidores que já estão instalados em consumidores. A maior dificuldade em relação à memória dos medidores é relativa ao armazenamento da oscilografia. Tomando como exemplo um medidor que realize 64 amostras por ciclo e que na detecção de um evento sejam armazenados 4 ciclos das três fases de tensão e das três fases de corrente, serão armazenados 1536 registros. Se cada registro de tensão e corrente utilizar 2 bytes para armazenamento, serão necessários 3072 bytes para cada registro de oscilografia.

Medidores que não tenham memória de dados suficiente para armazenar os dados de oscilografia podem apenas contabilizar a ocorrência dos eventos. Os regulamentos da ANEEL relativos aos procedimentos de distribuição – PRODIST – definem no módulo 8 [29] a metodologia para apuração de alguns indicadores de qualidade. No caso das VTCDs, além do registro do número de

---

ocorrências, estão previstas classificações por amplitude e duração que serão discretizadas após levantamento de medições.

O recurso de comunicação remota cria uma alternativa para a falta de memória, transmitindo para uma central de processamento e armazenamento os dados da oscilografia. Os canais de comunicação dos medidores que atendem a NBR14522 trabalham atualmente a velocidades de até 9600bps, suficiente para transferir os dados do medidor para uma central de análise em alguns segundos de conexão.

## **5.2 Detecção de transitórios oscilatórios**

As técnicas usadas na detecção dos transitórios foram: a decomposição de sinais, a transformada wavelet e a NEI. As simulações com e sem a presença de cargas não lineares mostraram a maior dificuldade de detecção e caracterização dos transitórios na presença de distorção harmônica. A detecção se torna mais difícil, pois é necessário elevar o nível da tensão de comparação. Em alguns casos, transitórios com pequena amplitude que podem ser detectados em um ambiente sem distorção harmônica deixam de ser detectados. A caracterização do transitório também se torna menos precisa, pois quando o limiar de detecção é elevado, a duração aparente do transitório diminui.

A tabela 5.1 mostra a eficiência da detecção em ambiente sem harmônicos para a decomposição, a NEI e a transformada wavelet usando as wavelet Db1, Db2, Db3, Db4 e Db8. A decomposição de sinais apresenta o melhor desempenho na detecção dos transitórios. A wavelet Db1 não apresenta bom

desempenho quando o limiar de detecção é baixo, mas a partir de 800 V (0,1PU) seu desempenho se torna equivalente à decomposição de sinais.

Limiar de detecção	Decomposição de sinais	NEI	Db1	Db2	Db3	Db4	Db8
100	98,4	62,2	0,0	98,8	100,0	100,0	100,0
200	100,0	99,6	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
300	100,0	99,5	0,0	100,0	100,0	99,3	98,8
400	100,0	98,9	0,0	99,8	99,1	98,8	96,8
500	100,0	97,9	0,0	99,6	97,3	96,4	95,5
600	99,8	97,1	0,0	97,0	95,9	96,1	95,0
700	99,5	96,3	0,0	95,7	93,9	93,2	91,6
800	99,1	94,5	94,1	94,3	93,0	91,8	90,2
900	98,8	93,6	100,0	93,2	92,0	89,8	87,2
1000	98,2	91,8	99,8	92,2	90,7	89,1	86,5
1100	97,7	90,9	99,8	91,6	89,3	88,2	85,6
1200	97,3	88,9	99,5	90,9	87,9	86,6	84,7
1300	96,6	87,3	98,4	90,6	86,1	84,3	84,3
1400	95,2	86,5	97,3	88,1	84,0	82,4	83,2
1500	94,7	84,3	95,9	85,9	82,2	80,4	82,0
1600	94,1	82,5	93,8	84,5	81,1	79,0	80,4
1700	93,4	81,8	92,5	83,2	79,9	77,7	76,3
1800	91,3	79,5	91,1	81,8	78,1	77,2	75,8
1900	90,0	78,8	90,2	80,2	76,8	75,4	74,9
2000	89,3	78,1	88,4	79,1	75,2	73,6	73,4
2100	88,4	76,8	87,0	78,3	73,1	71,8	72,9
2200	86,8	76,3	85,9	77,0	71,5	70,9	70,6
2300	86,5	74,9	84,8	76,3	71,3	68,8	67,7
2400	85,4	73,8	84,1	75,2	70,2	67,0	66,7
2500	84,7	73,1	82,9	74,7	68,8	66,0	65,1

Tabela 5.1 Eficiência (%) na detecção de transitórios sem distorção harmônica.

A figura 5.1 mostra os dados da Tabela 5.1 em forma gráfica. Desta forma fica mais fácil observar que a decomposição de sinais e a transformada wavelet utilizando a wavelet Db1 apresentam melhores resultados em um ambiente sem distorção harmônica, sendo que a wavelet DB1 não é adequada para baixos valores de limiar de detecção. As outras wavelets e a NEI apresentaram resultados semelhantes para todos os valores de limiar de detecção testados.

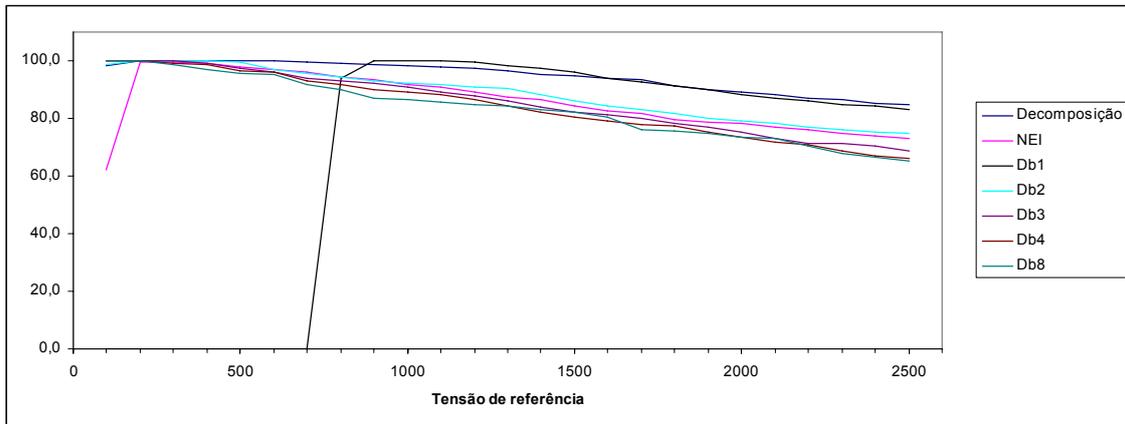


Figura 5.1 Dados da tabela 5.1 apresentados em forma gráfica.

A tabela 5.2 mostra a eficiência de detecção na presença de distorção harmônica. Pode-se observar que a decomposição de sinais deixa de ser a forma mais eficiente de detecção quando o valor do limiar de detecção é baixo. Neste caso a transformada wavelet se torna mais eficiente, com as wavelets Db4 e Db8 se destacando na detecção com o sinal de referência mais baixo. Com valores mais altos no limiar de detecção, tanto a decomposição de sinais quanto a wavelet Db1 voltam a apresentar bom desempenho superando as wavelets Db4 e Db8. O desempenho da NEI não se destacou na detecção dos eventos.

A criação de um limiar de detecção dinâmico pode solucionar este problema. O valor de tensão das componentes harmônicas, nos ciclos anteriores à ocorrência de eventos, pode ser adicionado ao limiar de detecção. Assim, o aumento da amplitude da distorção harmônica presente no sistema torna o detector menos sensível. A redução do nível de distorção harmônica aumenta a sensibilidade do detector.

Limiar de detecção	Decomposição de sinais	NEI	Db1	Db2	Db3	Db4	Db8
100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
300	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	31,6
400	0,0	0,0	0,0	0,0	19,3	25,0	51,5
500	0,0	0,0	0,0	20,3	40,1	47,8	55,6
600	0,0	0,0	0,0	32,4	56,9	58,5	55,1
700	0,4	0,0	0,0	56,5	63,5	66,0	64,3
800	2,1	0,0	0,0	71,1	68,1	69,0	66,1
900	46,5	0,0	0,0	81,1	82,7	82,4	76,8
1000	73,4	1,1	0,4	91,8	84,1	89,1	79,5
1100	75,9	8,0	6,2	92,7	90,7	90,9	83,8
1200	73,8	43,5	20,5	91,3	89,1	88,8	87,3
1300	70,6	70,9	46,2	90,6	86,8	85,6	86,5
1400	74,3	98,8	57,6	88,1	85,2	83,4	84,1
1500	77,9	81,8	64,7	85,9	82,5	82,2	82,0
1600	83,2	81,8	79,0	83,8	80,9	80,9	80,2
1700	86,1	77,2	91,8	82,0	79,5	78,6	78,8
1800	88,4	73,8	92,7	80,9	78,6	77,7	78,3
1900	92,0	68,6	90,2	79,9	76,8	75,9	77,2
2000	90,0	64,2	87,0	78,3	75,0	74,3	74,7
2100	88,8	60,1	85,4	76,1	73,1	72,9	74,2
2200	87,3	57,8	84,3	74,5	72,0	71,8	71,8
2300	85,6	55,6	82,9	73,6	68,8	70,2	68,3
2400	84,8	54,0	82,0	72,9	66,3	69,2	67,6
2500	84,0	53,3	80,7	72,4	64,9	67,2	66,8

Tabela 5.2 Eficiência (%) na detecção de transitórios com distorção harmônica.

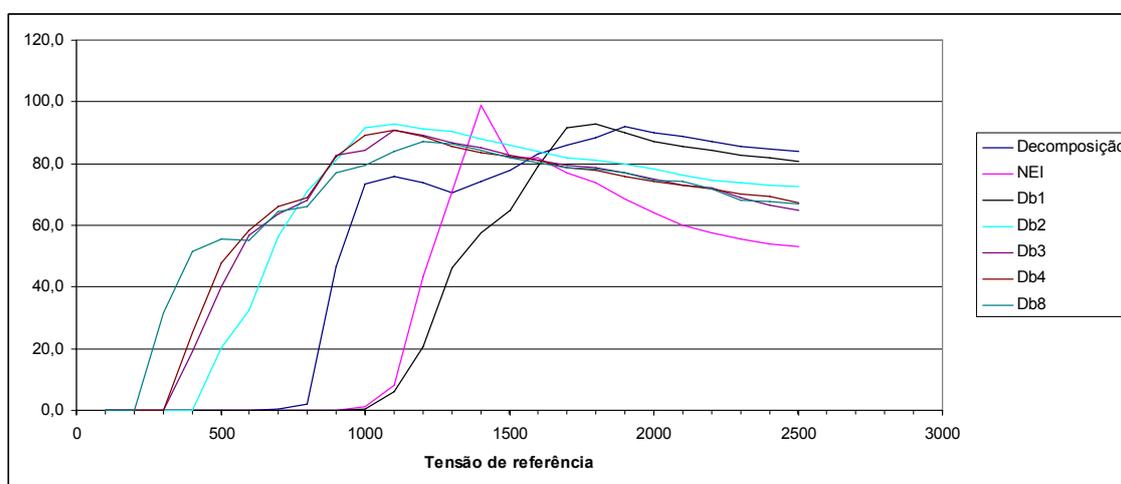


Figura 5.2 Dados da tabela 5.2 apresentados em forma gráfica.

---

No gráfico da figura 5.2 pode-se observar que o resultado da decomposição de sinais e da wavelet Db1 superam os demais a partir de 1700 V (0,214 PU) de limiar de detecção. Com limiar de detecção abaixo de 1000 V (0,126 PU) as wavelets Db8, Db4, Db3 e Db2 se destacam.

### **5.3 Detecção de VTCDs**

As técnicas usadas na detecção dos VTCDs foram: o valor eficaz, a NEI e a transformada wavelet. Do mesmo modo que ocorreu com a detecção de transitórios oscilatórios, a presença de distorção harmônica aumenta a dificuldade de detecção e caracterização dos VTCDs.

Na tabela 5.3 podem ser vistos os resultados dos três métodos testados para a detecção de VTCDs. Pode-se observar que em determinados valores do limiar de detecção, o programa que simula o medidor contabilizou para a transformada wavelet índices de detecção maiores que 100%. Nestes casos, o simulador de detecções identificou picos acima do limiar de detecção, em fases onde não foram simulados afundamentos ou elevações de tensão. Estas falsas indicações de eventos aparecem quando pequenos transitórios ocorrem em uma fase sã, devido à falta que ocorreu na outra fase. O programa que simula o medidor gera uma saída com todas as perturbações encontradas, que foram contabilizadas apenas para testar a eficiência da detecção. No caso de um medidor de faturamento que vai fazer um registro de oscilografia, depois de identificado o início de um evento, é ativado um sinalizador que impede a detecção de novos eventos até a estabilização do sistema.

Limiar de detecção	Valor eficaz	NEI	Db1	Db2	Db3	Db4	Db8
100	100.0%	100.0%	0.0%	101.1%	100.6%	101.1%	101.2%
200	100.0%	100.0%	14.2%	101.2%	101.2%	101.2%	101.2%
300	99.8%	100.0%	29.5%	101.2%	101.2%	101.2%	101.2%
400	99.7%	100.0%	46.0%	101.2%	101.2%	101.2%	101.2%
500	99.4%	100.0%	64.7%	101.2%	101.2%	101.2%	100.6%
600	98.8%	100.0%	69.4%	100.9%	101.2%	100.6%	100.6%
700	98.8%	100.0%	71.8%	100.6%	100.6%	100.6%	100.6%
800	98.3%	100.0%	73.9%	100.6%	100.6%	100.6%	100.6%
900	97.8%	99.7%	73.9%	100.6%	100.6%	100.6%	100.6%
1000	97.2%	99.7%	73.9%	100.6%	100.6%	100.6%	100.0%
1100	97.1%	99.7%	73.9%	100.6%	100.6%	100.6%	100.0%
1200	96.5%	99.7%	73.9%	100.6%	100.6%	100.0%	100.0%
1300	96.1%	99.7%	71.9%	100.3%	100.2%	99.8%	100.0%
1400	95.7%	99.7%	71.9%	100.0%	100.0%	99.8%	100.0%
1500	95.1%	99.7%	71.9%	100.0%	100.0%	99.8%	100.0%
1600	94.1%	99.7%	71.6%	100.0%	100.0%	95.1%	100.0%
1700	90.7%	99.7%	71.6%	100.0%	100.0%	93.1%	99.8%
1800	90.1%	99.7%	71.6%	100.0%	99.7%	89.7%	93.7%
1900	88.6%	99.7%	70.1%	100.0%	99.7%	86.3%	90.1%
2000	86.3%	99.7%	68.7%	100.0%	99.7%	79.8%	85.2%
2100	84.0%	99.1%	68.7%	100.0%	99.7%	72.7%	81.9%
2200	81.8%	99.1%	68.7%	99.7%	99.7%	70.4%	74.8%
2300	80.9%	99.1%	68.7%	98.6%	93.8%	68.1%	67.9%
2400	79.5%	99.1%	68.7%	95.1%	93.8%	68.1%	59.7%
2500	78.5%	99.1%	68.7%	93.4%	89.0%	68.1%	58.6%

Tabela 5.3 Eficiência dos métodos testados para detecção de VTCDs em circuitos sem distorção harmônica

A utilização da NEI e do valor eficaz são suficientes para a detecção dos VTCDs. O uso da transformada wavelet pode ser um complemento para caracterização da duração do evento.

Na tabela 5.4 são apresentados os resultados de detecção de VTCDs em ambiente com distorção harmônica. Novamente é possível observar que para alguns valores de limiar de detecção, a transformada wavelet apresenta falsas indicações de eventos, com índices de detecção maiores que 100%. Estes

pontos podem ser explicados como variações abruptas detectadas pelo programa de simulação, em uma fase diferente daquela onde está ocorrendo o evento simulado. Na figura 5.3 é mostrado um exemplo desta falsa detecção.

Limiar de detecção	Valor eficaz	NEI
100	100.00%	100.00%
200	100.00%	100.00%
300	100.00%	100.00%
400	99.70%	100.00%
500	99.50%	100.00%
600	99.10%	100.00%
700	98.80%	100.00%
800	98.30%	100.00%
900	97.80%	100.00%
1000	97.20%	100.00%
1100	97.10%	99.70%
1200	96.80%	99.70%
1300	96.10%	99.70%
1400	95.70%	99.70%
1500	95.20%	99.70%
1600	94.40%	99.70%
1700	91.20%	99.70%
1800	90.60%	99.70%
1900	88.10%	99.70%
2000	86.30%	99.70%
2100	84.00%	99.70%
2200	82.40%	99.70%
2300	81.30%	99.10%
2400	79.50%	99.10%
2500	78.50%	99.10%

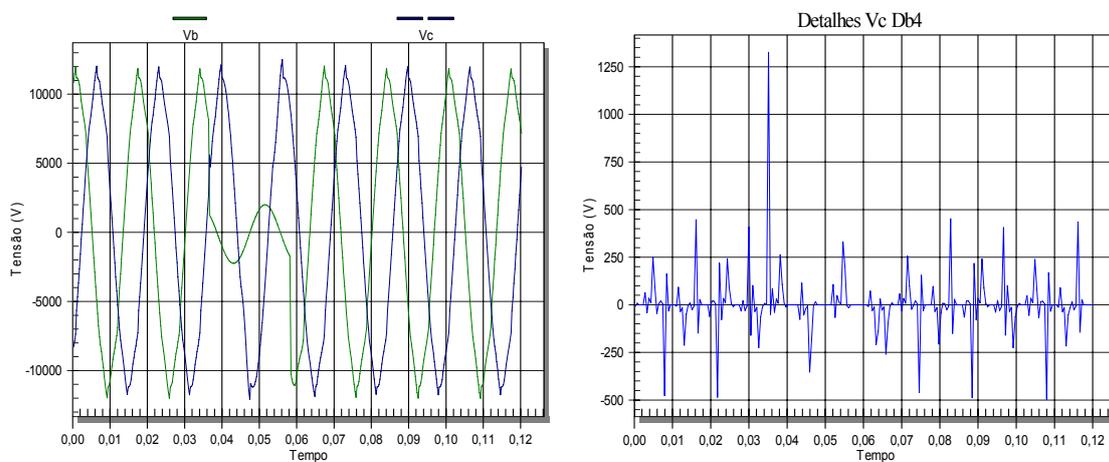
Limiar de detecção	Db2	Db3	Db4	Db8
1000	107.40%	107.40%	107.40%	107.40%
1100	107.40%	107.40%	107.40%	100.00%
1200	107.40%	107.40%	104.60%	100.00%
1300	107.40%	107.40%	102.80%	100.00%
1400	107.40%	105.60%	99.80%	100.00%
1500	107.40%	100.90%	99.80%	100.00%
1600	101.90%	100.00%	94.40%	100.00%
1700	100.00%	100.00%	91.80%	100.00%
1800	100.00%	100.00%	88.90%	93.70%
1900	100.00%	100.00%	86.00%	90.10%
2000	100.00%	99.80%	80.90%	85.00%
2100	100.00%	99.70%	75.80%	81.80%
2200	99.70%	99.70%	72.50%	75.20%
2300	98.60%	94.00%	70.40%	71.00%
2400	95.10%	94.00%	70.40%	65.10%
2500	93.10%	89.20%	70.40%	61.90%

Tabela 5.4 Eficiência dos métodos testados para detecção de VTCDs em circuitos com distorção harmônica

Na figura 5.3, é mostrada uma destas simulações com falsa detecção de evento pela transformada wavelet. Neste caso é simulada uma falta na fase B.

Na figura 5.3(a) são mostradas as tensões instantâneas das fases B e C. O

valor eficaz da fase C não sofre alteração suficiente para que seja indicada a ocorrência de um afundamento ou elevação de tensão. Na figura 5.3(b) são mostrados os coeficientes de detalhes da tensão da fase C, usando a wavelet Db4. O pico que se destaca ocorre no instante do afundamento da tensão da fase B e apresenta uma falsa indicação de VTCD na fase C.



(a) Sinal instantâneo das fases B e C

(b) Coeficientes de detalhes da fase C

Figura 5.3 Transitório em fase B dando falsa indicação de VTCD

Para que a transformada wavelet seja usada para detecção de eventos, o limiar de detecção deve ser elevado. A mesma proposta do limiar de detecção dinâmico, feita para os transitórios oscilatórios, é válida para a detecção de VTCDs utilizando-se a NEI ou a transformada wavelet. A tensão harmônica presente nos períodos anteriores aos eventos pode ser somada ao limiar de detecção para reduzir a sensibilidade de detecção. Este método é sugerido como continuidade deste trabalho para melhorar eficiência na detecção de eventos.

---

## Capítulo VI

### 6 Conclusões

Analisando os resultados obtidos com as diversas técnicas de detecção de eventos, pode-se concluir que elas podem ser aplicadas a alguns modelos de medidores eletrônicos de faturamento sem comprometer a capacidade de processamento dos mesmos. Os algoritmos de detecção não necessitam de recursos especiais de processamento, como por exemplo, cálculo em ponto flutuante, e podem ser adaptados e compilados para a maioria dos processadores utilizados por estes medidores.

Os medidores que aceitam alteração do seu programa operacional poderão receber o novo programa mesmo depois de instalados em campo. Esta troca pode ser feita sem alterações no circuito do medidor.

Modelos de medidores que não aceitam alteração de programa operacional, e que já estão instalados, não poderão receber estas funções. Estes modelos só poderão receber estes novos programas durante o processo de fabricação.

Modelos que trabalham com circuitos integrados que fazem todo o cálculo dos valores eficazes e energias, e cujo processador não tem acesso aos sinais amostrados, não poderão utilizar estes métodos para a detecção de eventos.

A escolha das técnicas de detecção para uso nos medidores deve levar em conta a forma como os eventos serão registrados. Em sua forma mais simples, funcionando como um rele de proteção que apenas identifica uma perturbação e faz um registro de oscilografia, recomenda-se o uso da NEI. Trabalhando

---

com os valores de tensão elevados ao quadrado, sem extração da raiz, é o método que causa o menor impacto no tempo de processamento do medidor.

Para a detecção de VTCDs, o uso do valor eficaz, utilizando janelas de integração de um ciclo atualizadas a cada meio ciclo, é a técnica mais adequada. A TW e a NEI podem ser usadas como complemento, quando for necessária uma maior precisão para indicar o instante de início e a duração do evento.

A detecção de transitórios oscilatórios pode ser feita com todas as três técnicas testadas. Pelos resultados obtidos das simulações, pode-se concluir que:

- A decomposição de sinais é a técnica que oferece a melhor precisão para caracterizar o evento, pois permite medir precisamente a amplitude e o instante de ocorrência. A duração do evento pode ser estimada, mas depende dos níveis de ruído e distorção harmônica presentes no sinal.
- O uso do primeiro nível de detalhes da transformada wavelet pode ser usado apenas como indicador do instante de início do evento.
- A NEI pode ser usada apenas para detectar a ocorrência do evento, mas sem fornecer a indicação da fase em que ocorreu.

As recomendações para os medidores de faturamento, que registram a oscilografia e também classificam os eventos, são a decomposição de sinais para detecção de transitórios oscilatórios e o valor eficaz para a detecção de VTCDs. Porém, havendo capacidade de processamento, recomenda-se adicionar o cálculo da NEI e da transformada wavelet para melhorar a precisão da caracterização dos eventos. Medidores que utilizarem a NEI contarão com um recurso extra para a detecção de desequilíbrios e distorção harmônica.

---

Medidores que utilizarem a TW poderão utilizar a AMR para classificar os fenômenos detectados.

Os objetivos propostos no início deste trabalho foram atingidos. Os fenômenos que afetam a qualidade de energia elétrica foram estudados e selecionados os eventos que poderiam ser detectados por medidores de faturamento. Diferentes técnicas de detecção foram estudadas e foram desenvolvidos algoritmos que podem ser utilizados em medidores de faturamento. Também foram feitas simulações de eventos e os algoritmos desenvolvidos foram testados na detecção destes eventos.

### **6.1 Propostas para novos estudos**

A rápida evolução da capacidade de processamento e o aumento da memória de dados dos medidores indicam que os novos modelos serão capazes de detectar e classificar diversos tipos de eventos, além de armazenar vários registros de oscilografia.

Dando continuidade a este trabalho podem ser desenvolvidos novos estudos.

Como sugestão, podem ser citados:

- gerar em laboratório as formas de onda simuladas e testar os algoritmos de detecção dos eventos em sistemas de aquisição de sinais
- acrescentar estas funções em medidores eletrônicos de faturamento e verificar seu desempenho quando instalados em campo
- estudar o comportamento de outras wavelets para verificar quais as mais indicadas para a detecção de cada tipo de evento

- 
- realizar estudos com as wavelets em vários níveis de decomposição (AMR) para desenvolver métodos de classificação de eventos
  - estudar o uso da NEI na detecção de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica
  - propor uma padronização de comandos de leitura para a NBR 14522 [4], que trata da comunicação com os medidores eletrônicos de faturamento, relacionados a oscilografia e detecção de eventos

---

### Referências Bibliográficas

- [1] Handbook for Electricity Metering – 2002 – Edison Electric Institute – 10<sup>th</sup> Edition.
- [2] ANEEL Resolução 024 de 2000 . Continuidade da distribuição de energia elétrica. Disponível em: [www.aneel.gov.br/cedoc/res2000024.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000024.pdf)
- [3] ANEEL Resolução 505 de 2001. Conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente. Disponível em: [www.aneel.gov.br/cedoc/res2001505.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2001505.pdf)
- [4] ABNT NBR14522 ( 2004 ). Intercâmbio de informações para sistemas de medição de energia elétrica – Padronização.
- [5] IEEE 1159 (1995) Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [6] IEC 61000-4-7 (2002). Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurement and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.
- [7] IEC 61000-4-15 (1998). Flickermeter – Functional and design specifications.
- [8] IEC 61000-4-30 (2003). Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.
- [9] Smith, Steven W. (1997). The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing. Disponível em: [www.dspsguide.com](http://www.dspsguide.com)

- 
- [10] Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F.; Santoso, S.; Beaty, H. W.; (2002) - 2<sup>nd</sup> Edition - Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill.
- [11] Walker, James S. (2008). A Prime on Wavelets and Their Scientific Applications. Chapman & Hall/CRC.
- [12] Bollen, Math H. J.; Gu, Irene Y. H. (2006). Signal Processing of Power Quality Disturbances. John Wiley & Sons.
- [13] Santoso, Surya; Grady, W. Mack; Powers, Edward J.; Lamoree, Jeff; Bhatt, Siddharth C. (2000). Characterization of Distribution Power Quality Events with Fourier and Wavelet Transforms. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 15, jan. 2000.
- [14] Gaouda, A. M.; Salama, M. M. A.; Sultan, M. R.; Chikhani, A. Y. (1999) Power Quality Detection and Classification Using Wavelet-Multiresolution Signal Decomposition. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 14, out. 1999.
- [15] Kim, C. H.; Aggarwal, R. (2000). Wavelet transforms in power systems: Part 1 General introduction to the wavelet transforms. Power Engineering Journal, abr. 2000.
- [16] Kim, C. H.; Aggarwal, R. (2001). Wavelet transforms in power systems: Part 2 Examples of application to actual power system transients. Power Engineering Journal, ago. 2001.
- [17] Flores, Rafael A.; Bollen, Math H. J.; Gu, Irene Y. H.; (2003). Positive and Negative Sequence Estimation for unbalanced voltage dips, IEEE. pag 2498 – 2502.

- 
- [18] Bollen, Math H. J.; Gu, Irene Y. H.; (2007). On the analysis of voltage and current transients in three-phase power systems, IEEE Transactions on power delivery, vol 22, abr. 2007.
- [19] Silveira, Paulo M.; Steurer, Michael; Ribeiro, Paulo F. (2007). Using wavelet decomposition for visualization and understanding of time-varying waveform distortion in Power systems. VII CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Santos, São Paulo, Brasil.
- [20] Delmont Filho, Odilon (2003). Utilização da transformada wavelet para caracterização de distúrbios na qualidade da energia elétrica. Dissertação de Mestrado. USP – EESC – Escola de Engenharia de São Carlos.
- [21] Marafão, Fernando P. (2000). Contribuições para a teoria de potências instantâneas e aplicações em qualidade de energia. Dissertação de Mestrado. Unicamp – Universidade de Campinas.
- [22] Garcia, Valdomiro V. (2007) Detección y clasificación automática de perturbaciones que afectan la calidad de la energia eléctrica. Dissertação de Mestrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colômbia.
- [23] Duarte, Silvio X. (2007). Proposta de indicador de qualidade de tensão a partir do impacto de distorções harmônicas e desequilíbrios sobre motores de indução. Tese de doutorado, Escola Politécnica da USP.
- [24] Marafão, Fernando P. (2004). Análise e controle da energia elétrica através de técnicas de processamento digital de sinais. Tese de Doutorado, Unicamp – Universidade de Campinas.

- 
- [25] Delmont Filho, Odilon (2007). Um algoritmo para detecção, localização e classificação de distúrbios na qualidade da energia elétrica utilizando a transformada wavelet. Tese de Doutorado, USP – EESC – Escola de Engenharia de São Carlos.
- [26] Axelberg, P.; Bollen, M. H. J.; Gu, I. Y. H.; (2007) A Measurement Method for Determining the Direction of Propagation of Flicker and for Tracing a Flicker Source. VII CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Santos, São Paulo, Brasil.
- [27] Kagan, N. et al. (2000); Influence of RMS variation measurement protocols on electrical system performance indices for voltage sags and swells; Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power; p790 – 795.
- [28] Santoso, S.; Powers, E. J.; Grady, M.; (1994) Electric Power Quality Disturbance Detection Using Wavelet Transform Analysis; Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis; pag 166 – 169.
- [29] ANEEL - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: [www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8\\_19022008\\_SRD.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_19022008_SRD.pdf)
- [30] ANEEL - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 5 – Sistemas de Medição. Disponível em: [www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo5\\_19022008\\_SRD.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo5_19022008_SRD.pdf)
- [31] Inmetro - Ensaio de Apreciação Técnica de Modelo Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica. Disponível em: [www.inmetro.gov.br/kits/niedimel036.doc](http://www.inmetro.gov.br/kits/niedimel036.doc)

## A. Apêndice

### Eventos reais ocorridos em rede elétrica

Um conjunto de 60 leituras de tensão de uma concessionária foi utilizado para testar o programa de detecção. A taxa de amostragem é de 64 amostras por ciclo. Alguns exemplos destas leituras são mostrados nas figuras A.1 a A.7.

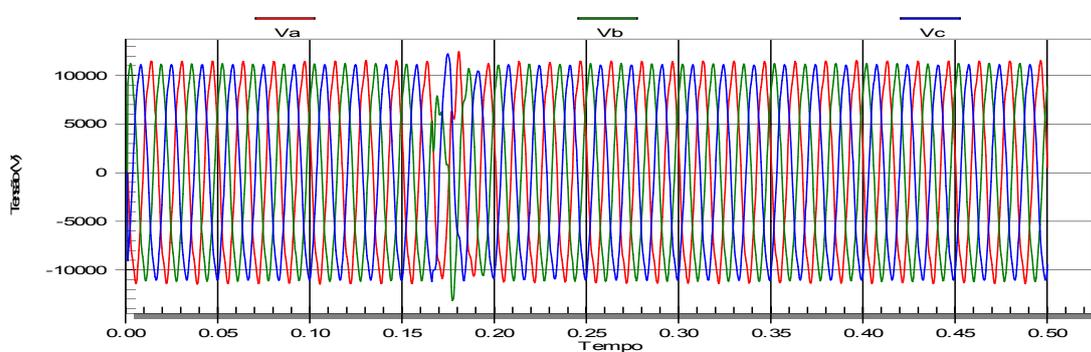


Figura A.1 Evento\_002

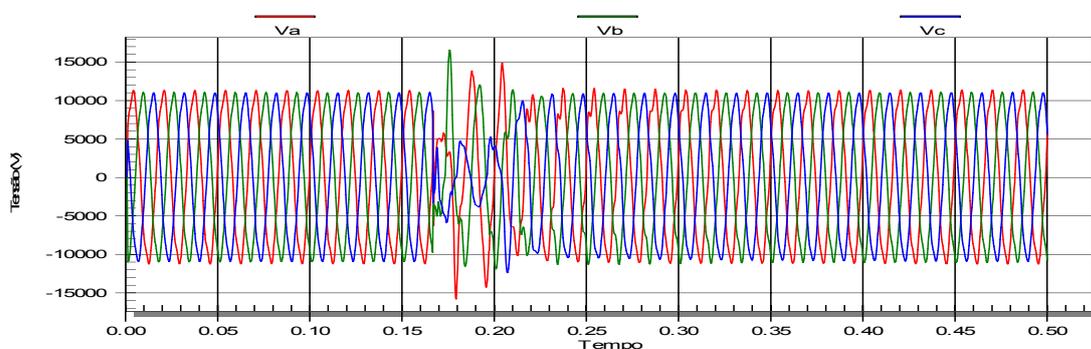


Figura A.2 Evento\_003

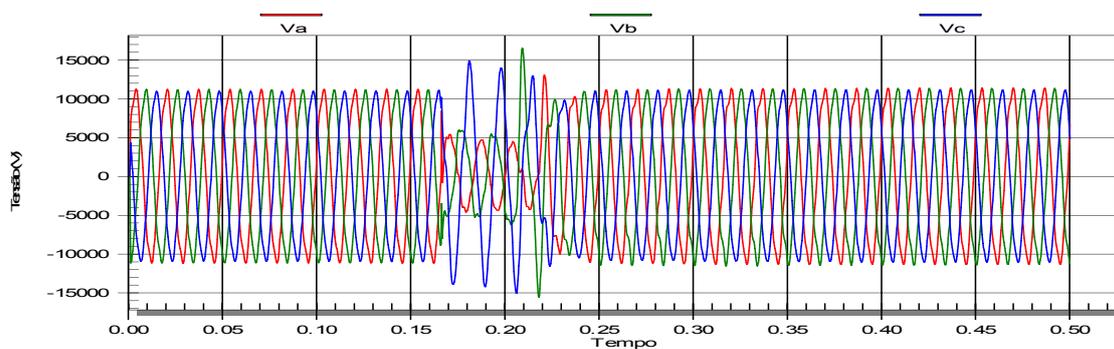


Figura A.3 Evento\_005

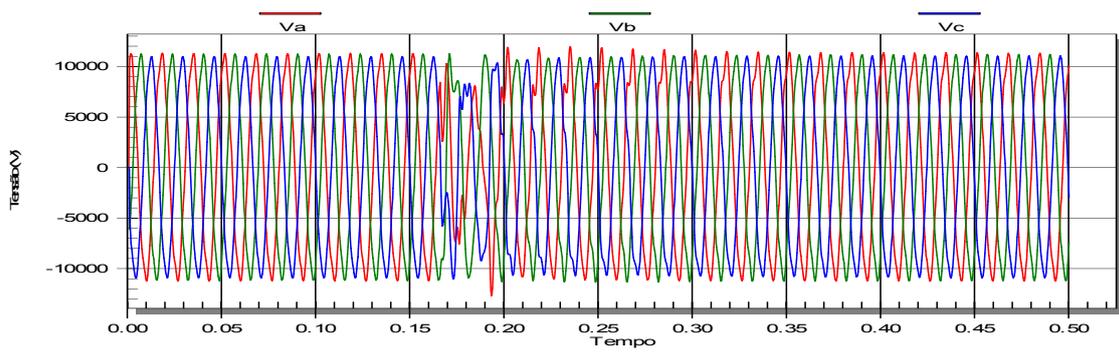


Figura A.4 Evento\_009

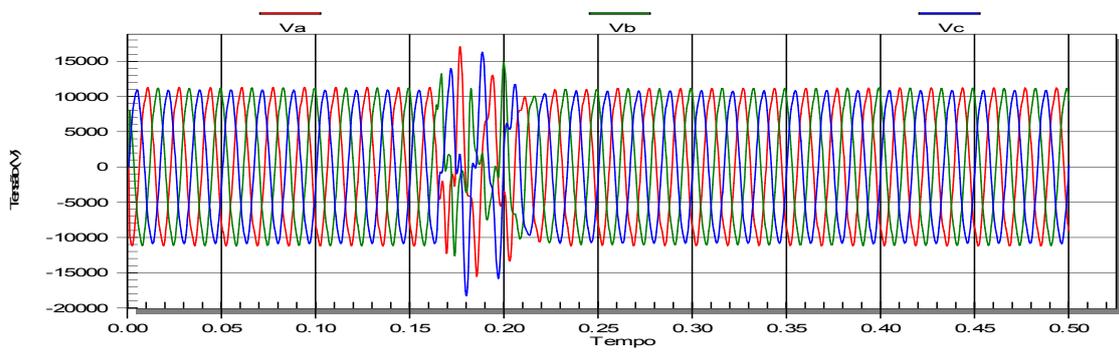


Figura A.5 Evento\_012

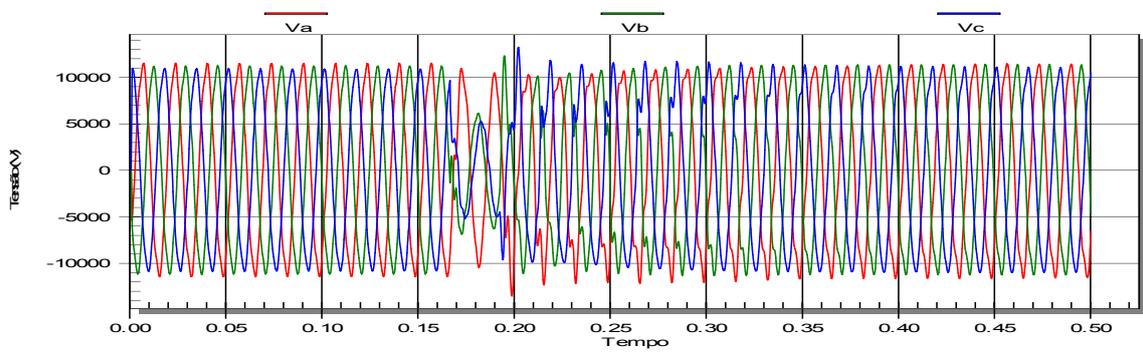


Figura A.6 Evento\_013

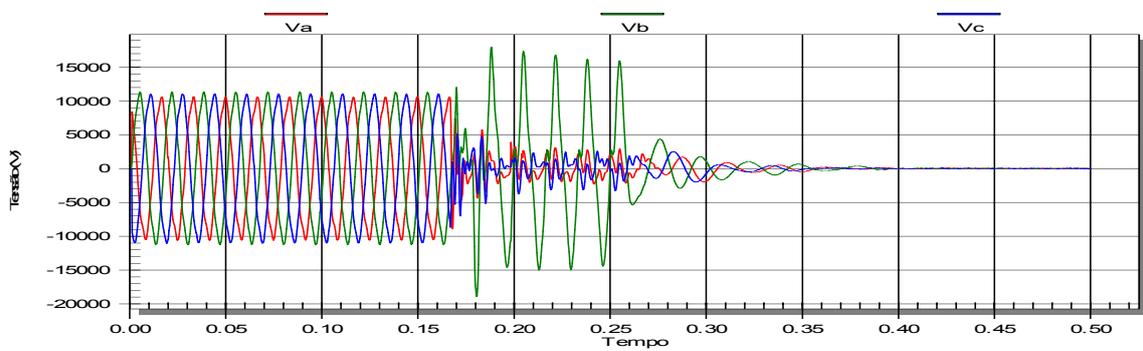


Figura A.7 Evento\_060

## MatLab/Simulink – Modelos utilizados e dados gerados

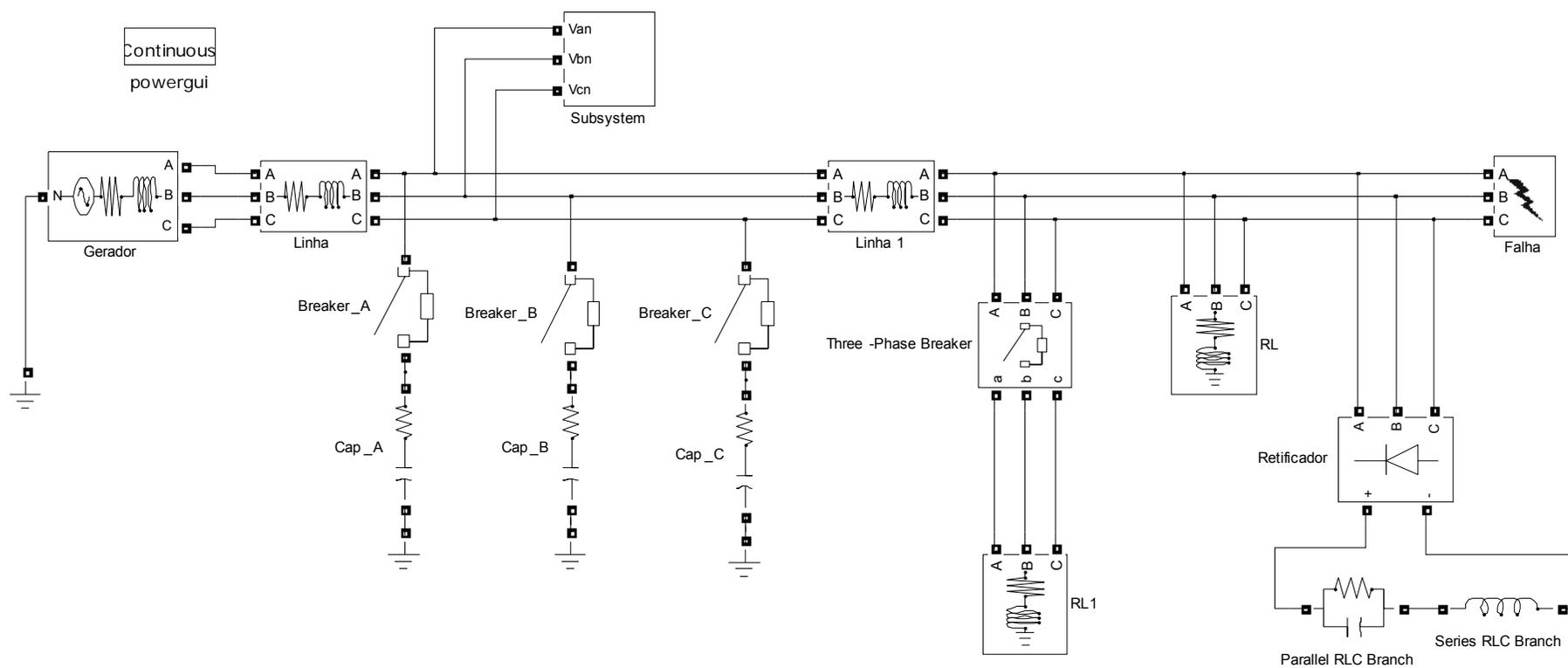


Figura .A.8 Circuito usado para a simulação de transitórios e VTCDs

O circuito apresentado na figura A.8 é o modelo de rede de distribuição utilizado para a simulação dos transitórios oscilatórios e dos VTCDs. Basicamente é composto por um gerador trifásico de 60 Hz com dois segmentos de linha de distribuição modelados com parâmetros RL. O objetivo destas simulações é a criação de vários eventos, para teste dos algoritmos de detecção. Para isso foram realizadas diversas simulações com diferentes amplitudes, instante de início e duração. Optou-se por este modelo pela sua flexibilidade em gerar automaticamente uma série de simulações, com variações de todos os parâmetros necessários.

No primeiro segmento de linha de transmissão estão os bancos de capacitores, que são acionados para a geração dos transitórios oscilatórios. Também pode ser visto o bloco (Subsystem) onde são simuladas as funções de amostragem e os dados são exportados para o MatLab.4

No segundo segmento podem ser vistas as cargas lineares e não lineares, o circuito simulador de falta na rede e um grupo de cargas lineares controlada por um disjuntor que produz as elevações de tensão na sua desconexão.

A figura A.9 mostra o modelo de exportação dos dados amostrados. São criadas as variáveis  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ . Na figura A.10 podem ser vistos os parâmetros da variável  $V_a$ , com a amostragem ocorrendo a cada 256.4  $\mu$ s.

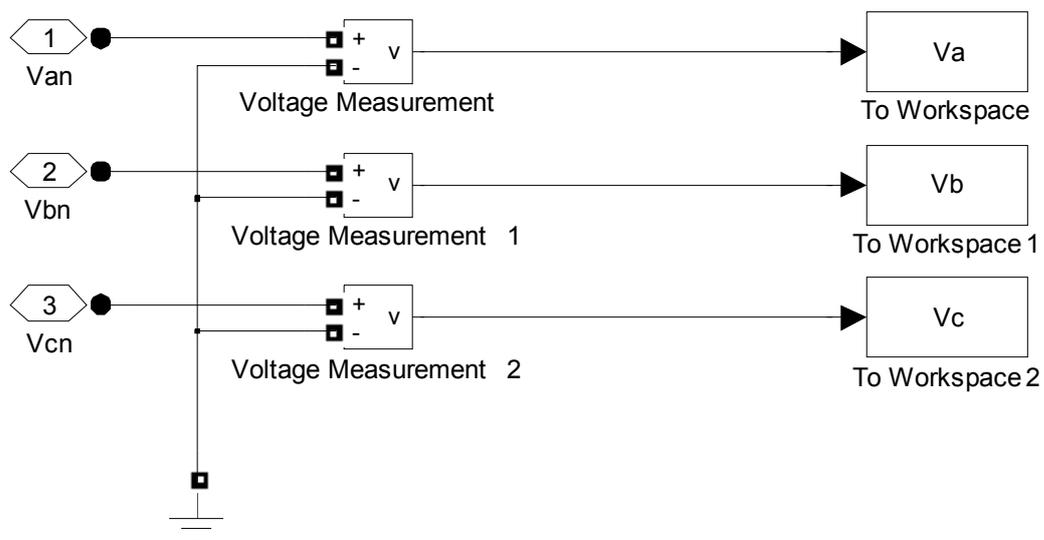


Figura A.9 Exportação dos valores instantâneos do Simulink para o MatLab

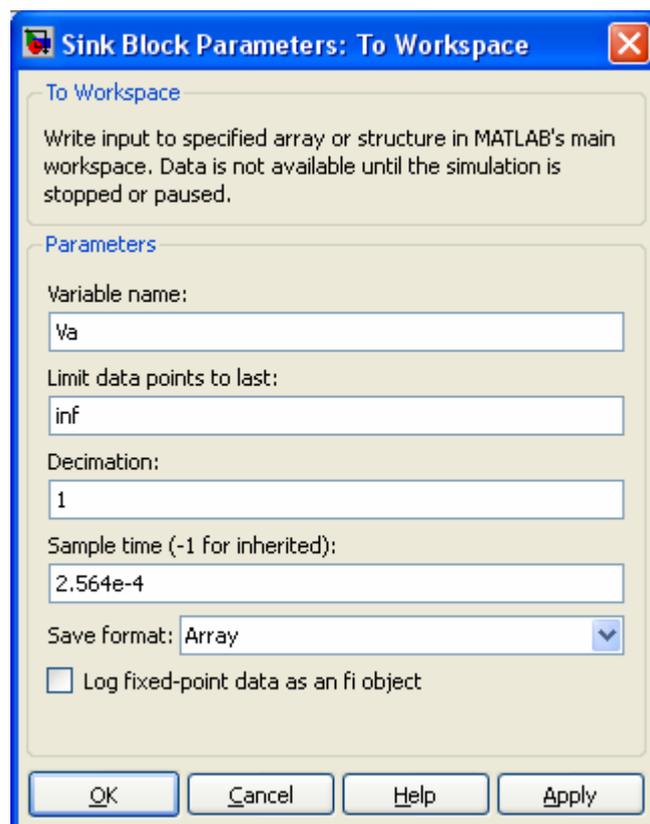


Figura A.10 Parâmetros de variável exportada para o MatLab com tempo de amostragem de 256,4  $\mu$ s

Na figura A.11 é visto o modelo para cálculo da NEI. Os valores amostrados são elevados ao quadrado, somados e então se extrai a raiz quadrada.

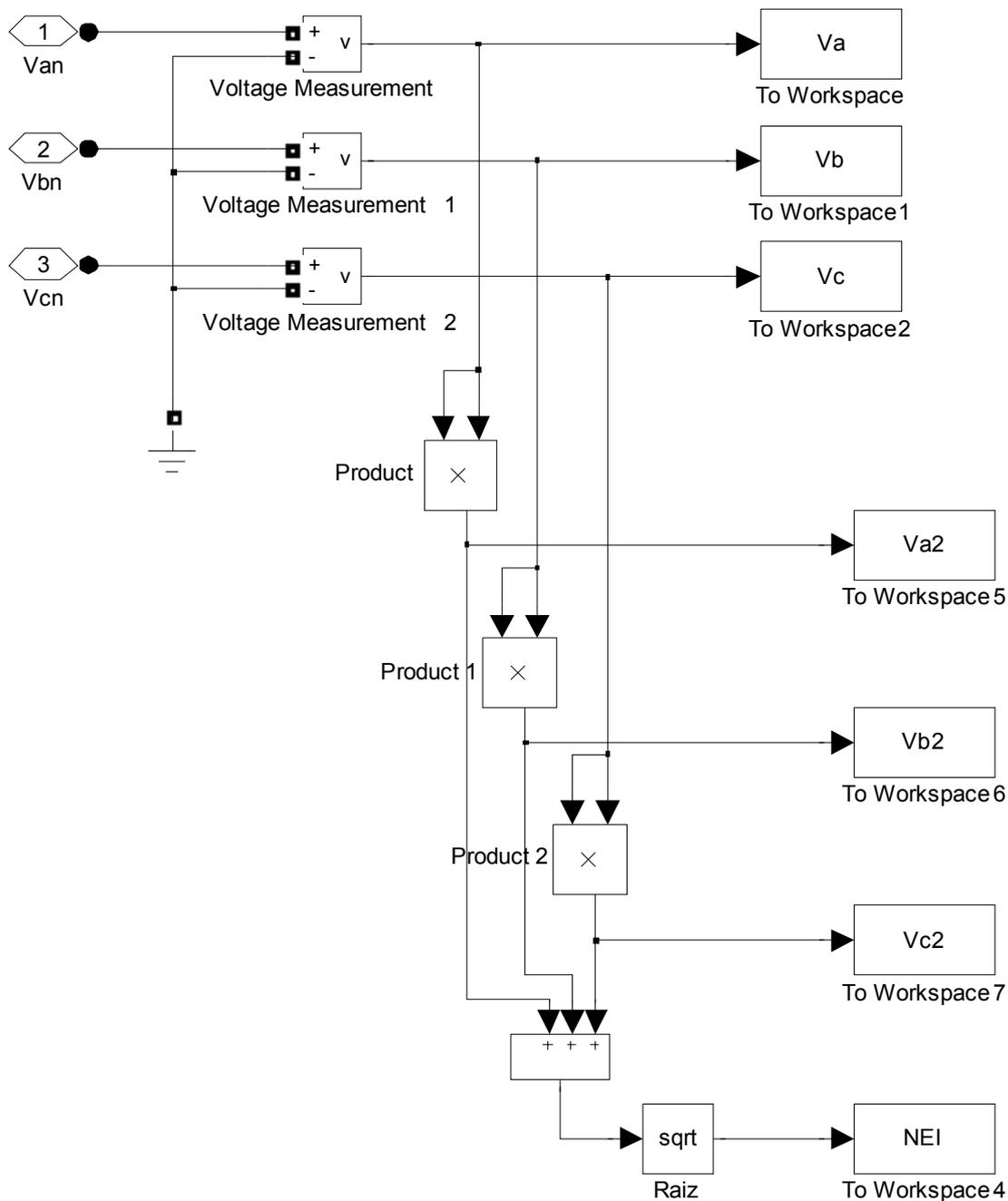


Figura A.11 Cálculo da NEI no Simulink e exportação para o MatLab

Na figura A.12 é visto o modelo de exportação dos valores eficazes. Na figura A.13 os parâmetros utilizados pelo Simulink para cálculo do valor eficaz.

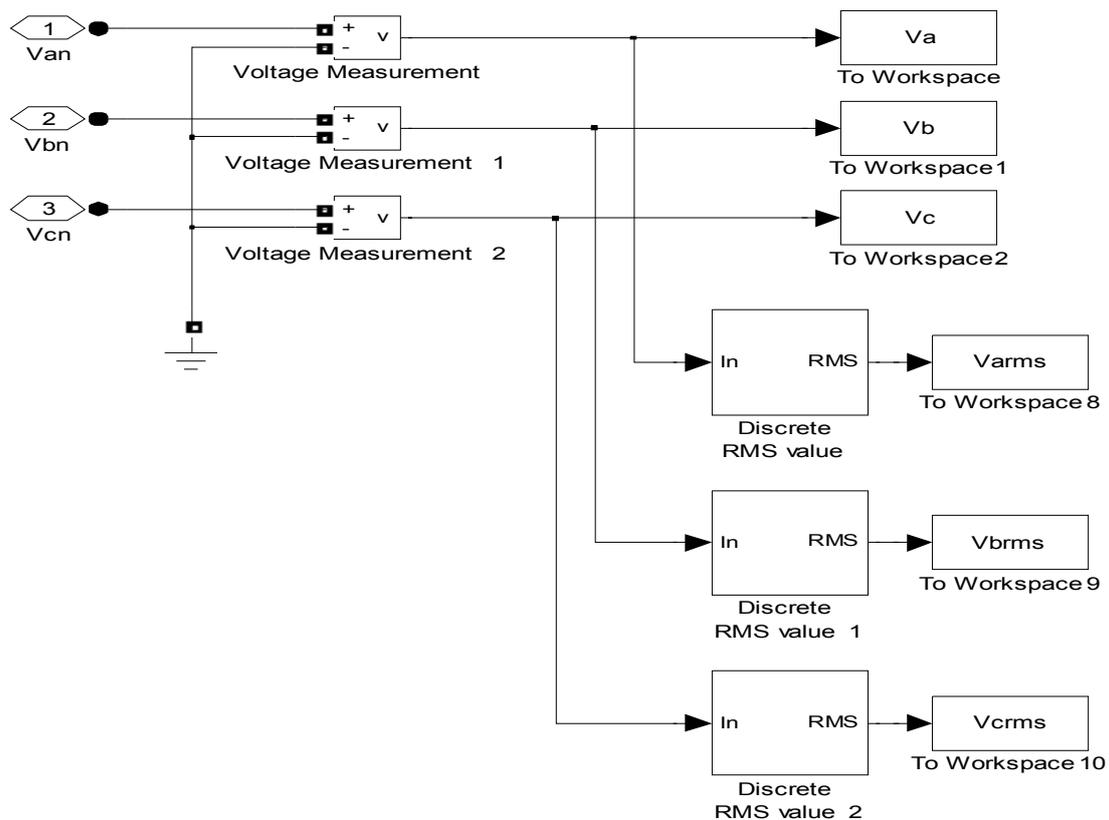


Figura A.12 Cálculo dos valores eficazes e exportação para o MatLab

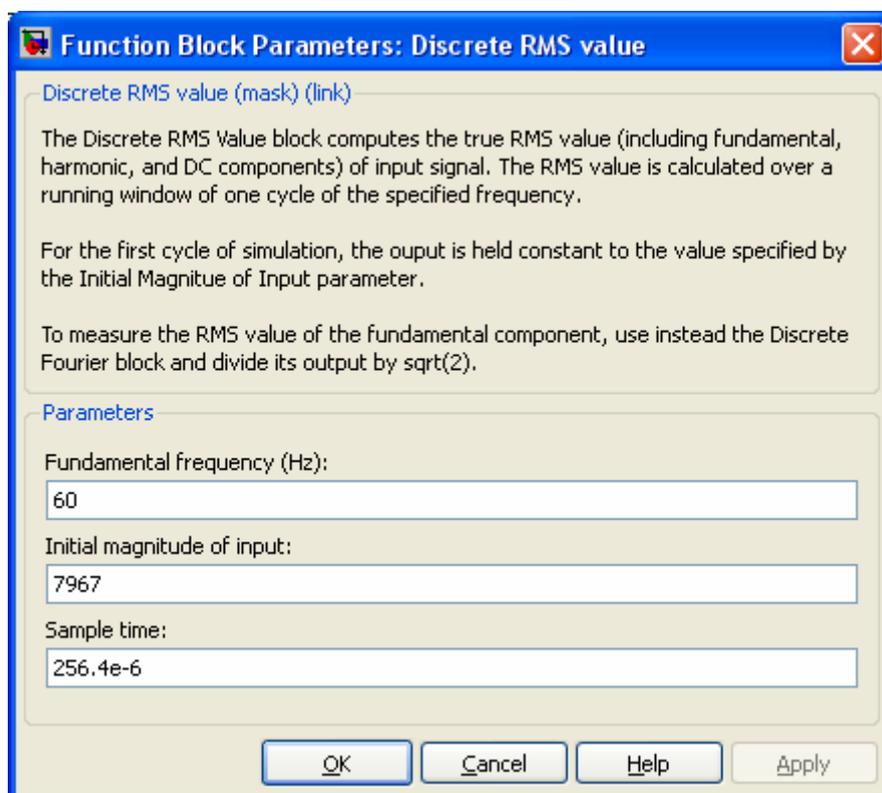


Figura A.13 Parâmetros do cálculo do valor eficaz

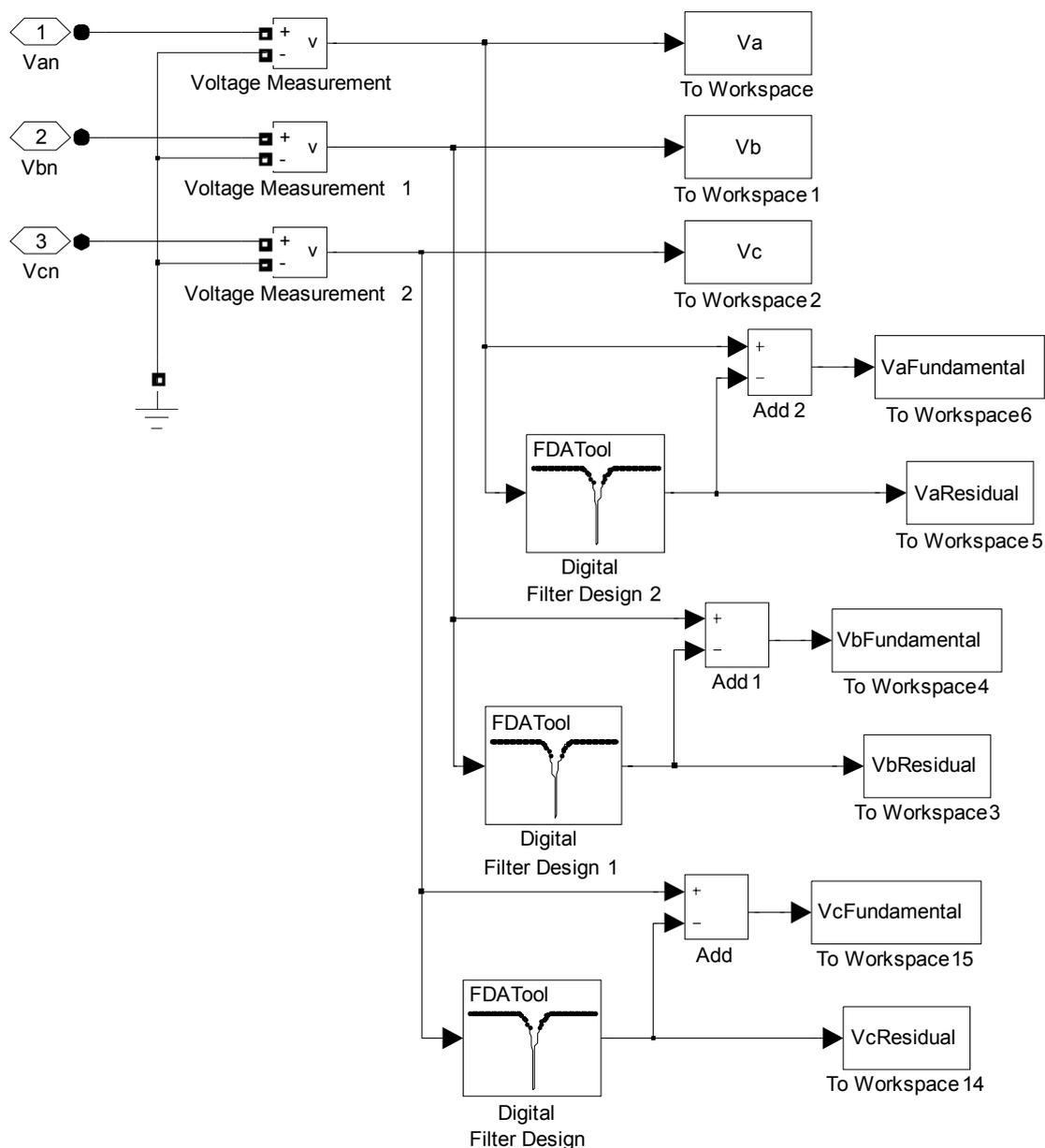
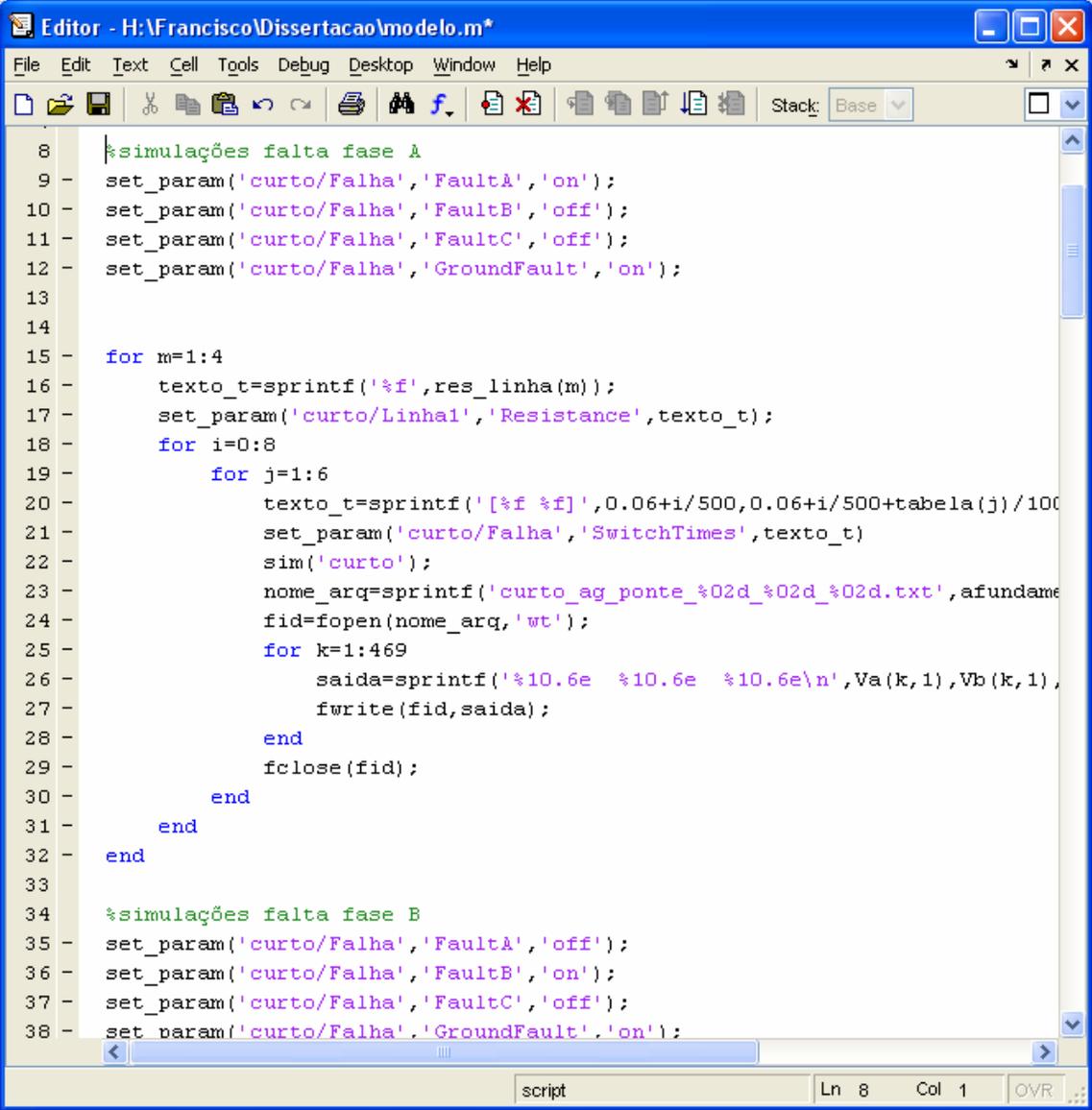


Figura A.14 Decomposição em componentes fundamental e residual

Na figura A.14 é visto o modelo utilizado pelo Simulink para a decomposição dos sinais em suas componentes fundamental e residual. Um filtro rejeita-faixa sintonizado em 60 Hz produz o sinal residual. A diferença deste sinal com o sinal amostrado gera o sinal fundamental.



```

8   %simulações falta fase A
9   set_param('curto/Falha','FaultA','on');
10  set_param('curto/Falha','FaultB','off');
11  set_param('curto/Falha','FaultC','off');
12  set_param('curto/Falha','GroundFault','on');
13
14
15  for m=1:4
16      texto_t=sprintf('%f',res_linha(m));
17      set_param('curto/Linha1','Resistance',texto_t);
18      for i=0:8
19          for j=1:6
20              texto_t=sprintf(' [%f %f]',0.06+i/500,0.06+i/500+tabela(j)/100);
21              set_param('curto/Falha','SwitchTimes',texto_t);
22              sim('curto');
23              nome_arq=sprintf('curto_ag_ponte_%02d_%02d_%02d.txt',afundame
24              fid=fopen(nome_arq,'wt');
25              for k=1:469
26                  saida=sprintf('%10.6e %10.6e %10.6e\n',Va(k,1),Vb(k,1),
27                  fwrite(fid,saida);
28              end
29              fclose(fid);
30          end
31      end
32  end
33
34  %simulações falta fase B
35  set_param('curto/Falha','FaultA','off');
36  set_param('curto/Falha','FaultB','on');
37  set_param('curto/Falha','FaultC','off');
38  set_param('curto/Falha','GroundFault','on');

```

Figura A.15 Exemplo de programa para controle de múltiplas simulações com variação de parâmetros

A figura A.15 mostra um trecho de programa do MatLab que realiza múltiplas simulações de um circuito. Neste exemplo, através dos comandos **'set\_param'**, são alteradas as fases em que ocorrem as faltas, a resistência da linha de transmissão e os instantes em que ocorrem os chaveamentos. O comando **'sim()'** inicia a simulação através do Simulink e quando esta termina, os dados transferidos para o ambiente do MatLab são salvos em arquivo.

## **Comparações dos dados do simulador de detecções com os dados do Simulink**

Os resultados da simulação com o Simulink produziram os valores de tensão eficaz, da NEI, da decomposição de sinais em componente fundamental e residual. Os arquivos gerados no MatLab e utilizados pelo programa simulador de detecção contém apenas os dados das três tensões de fase.

Para verificar a precisão dos cálculos do simulador de detecção, seus dados foram comparados com os dados do MatLab. Os dados dos coeficientes de detalhes da transformada wavelet que não foram gerados pelo Simulink foram calculados no ambiente do MatLab com a função '*dwt*'.

A figura A.16 mostra um afundamento de tensão gerado pelo Simulink, que é usado como referência para comparar os resultados do programa de análise. Na figura A.17 pode ser visto o gráfico deste afundamento com os dados lidos pelo programa de análise.

As figuras A.18 e A.19 mostram a tensão eficaz calculada nos dois programas, sendo os resultados do programa de análise apresentam os valores calculados com janela fixa e com janela deslizante.

As figuras A.20 e A.21 mostram o valor da NEI calculado nos dois programas.

As figuras A.22 e A.23 mostram o primeiro nível de decomposição usando a wavelet Db2.

As figuras A.24 e A.25 mostram o primeiro nível de decomposição usando a wavelet Db8.

As figuras A.26 e A.27 mostram a componente residual de um transitório oscilatório calculada pelos dois programas.

Os gráficos criados pelo MatLab (A16, A18, A20, A22, A24 e A26) exibem no eixo das abscissas o número da amostra enquanto os gráficos criados pelo simulador (A17, A19, A21, A23, A25 e A27) exibem no eixo X o tempo.

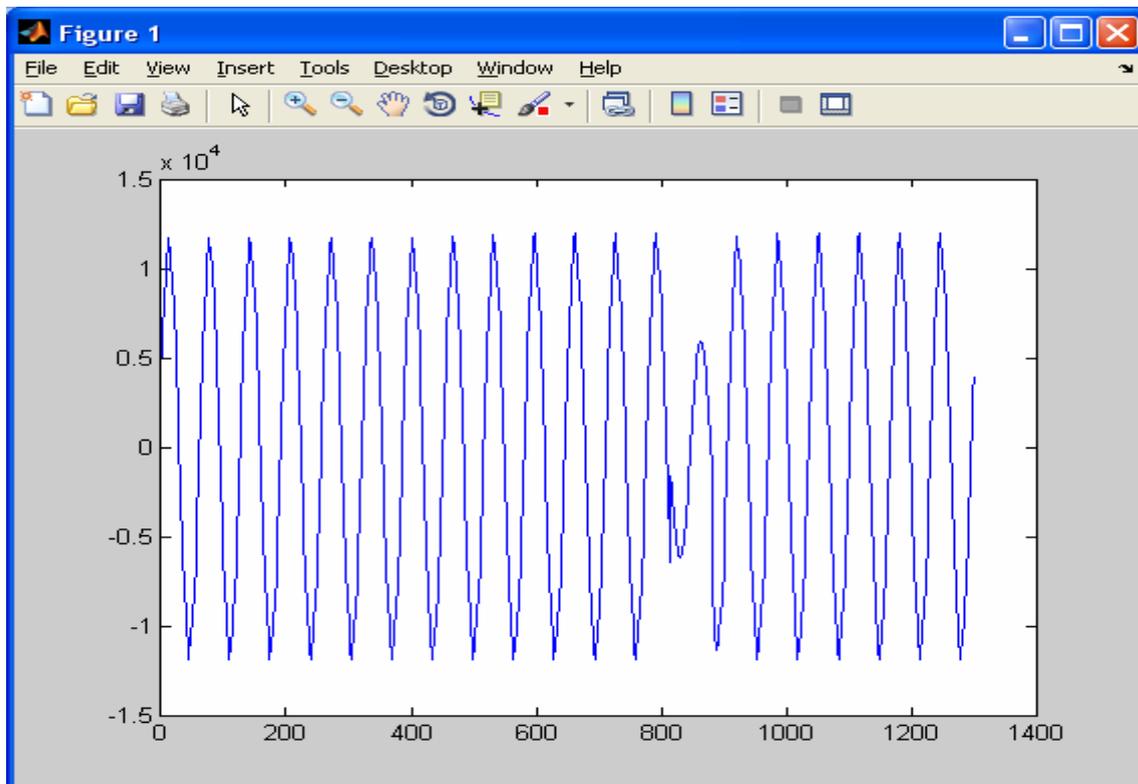


Figura A.16 Afundamento de tensão gerado no Simulink

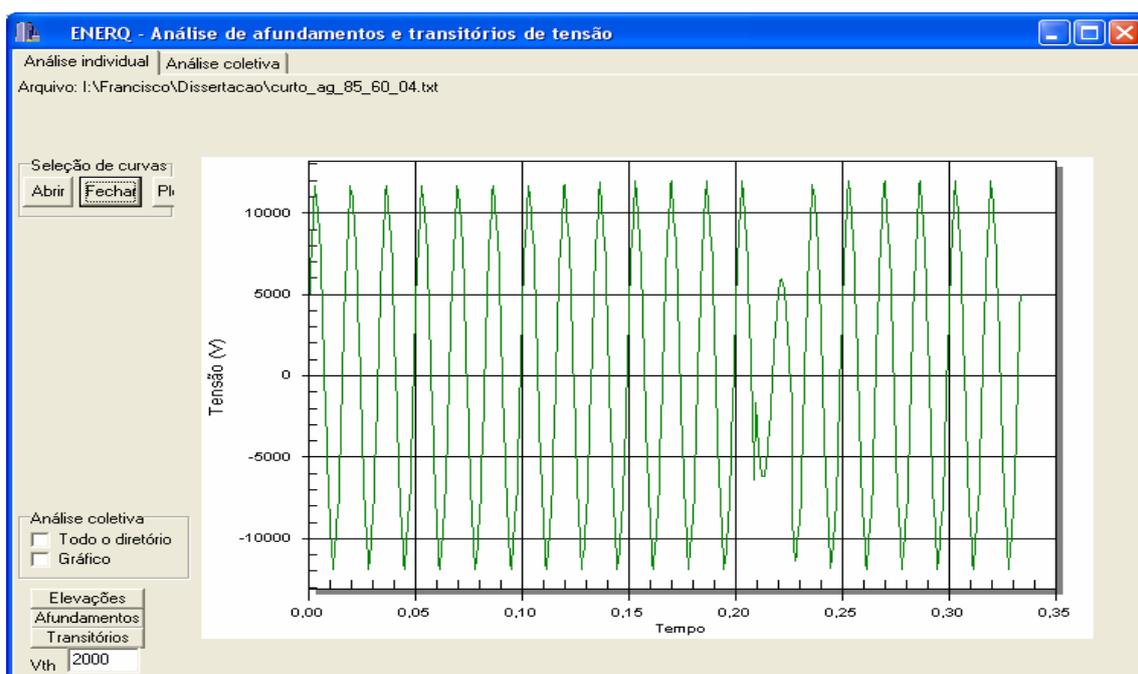


Figura A.17 Afundamento de tensão visto a partir do programa de análise

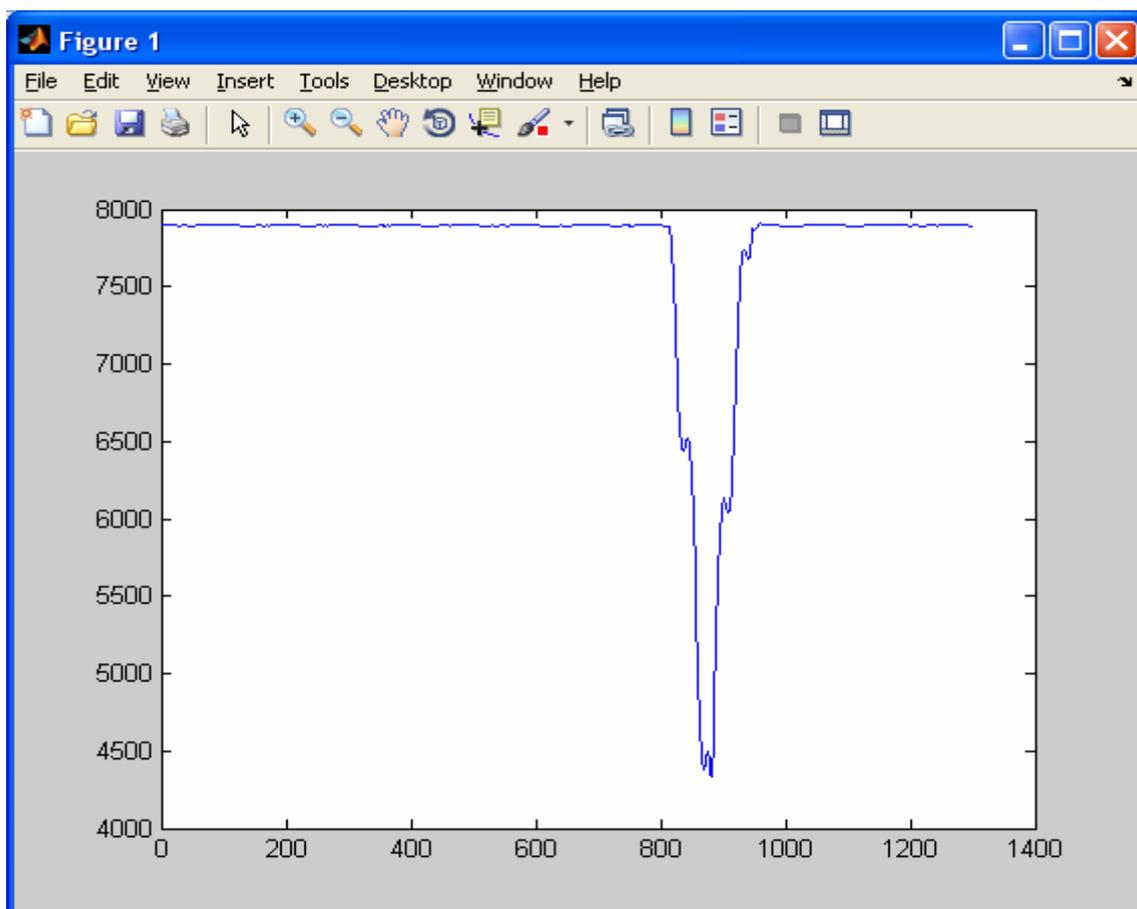


Figura A.18 Tensão eficaz calculada pelo Simulink

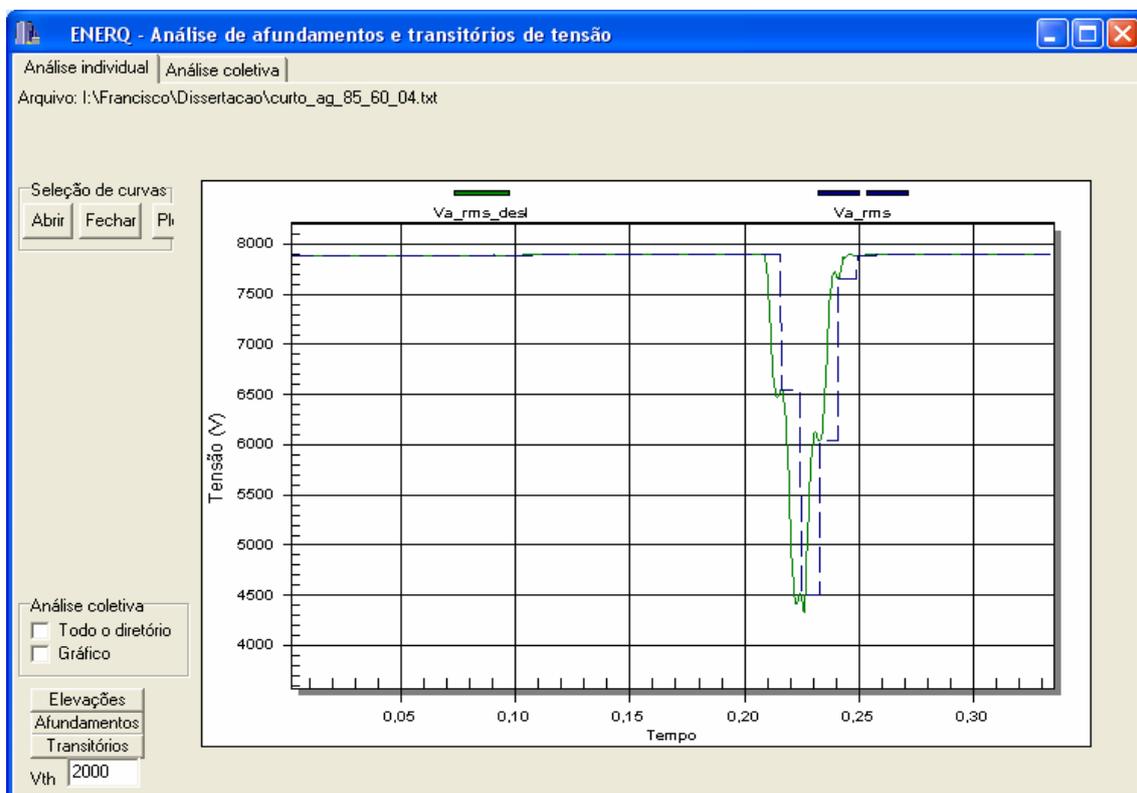


Figura A.19 Tensão eficaz calculada pelo programa de análise

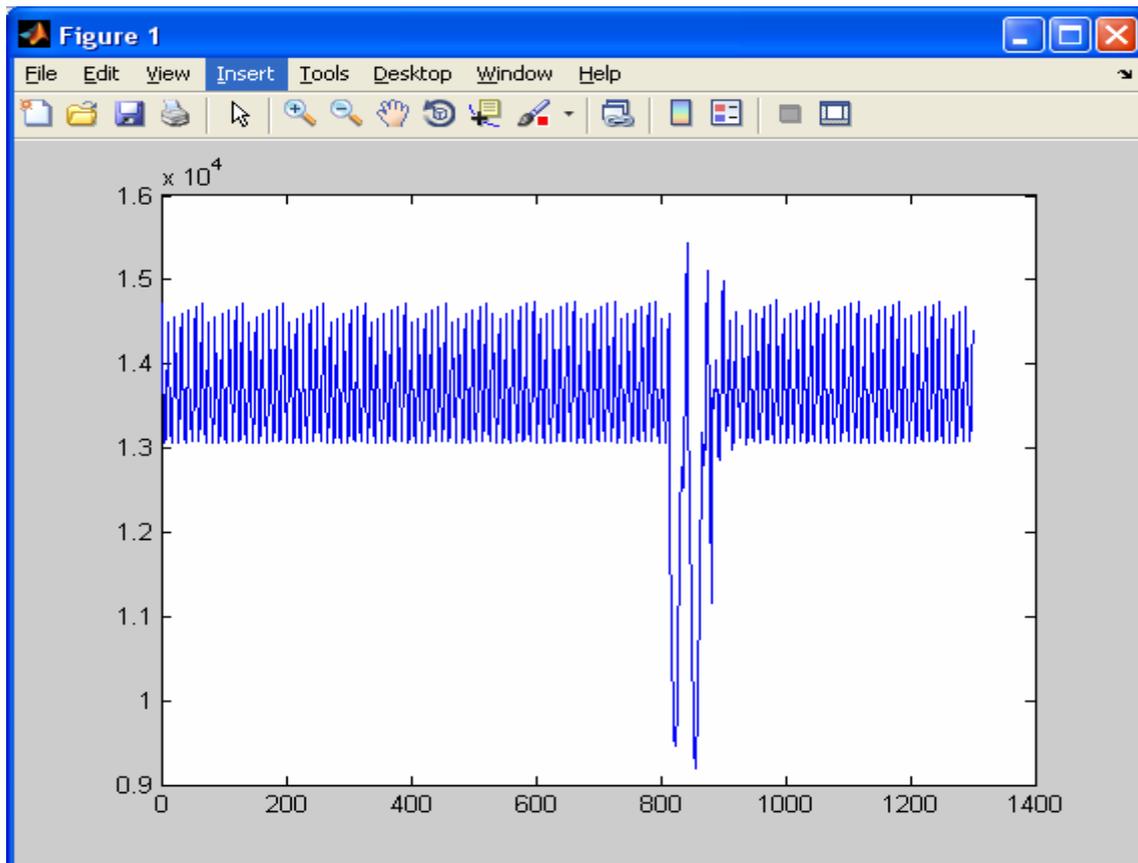


Figura A.20 NEI calculada pelo Simulink

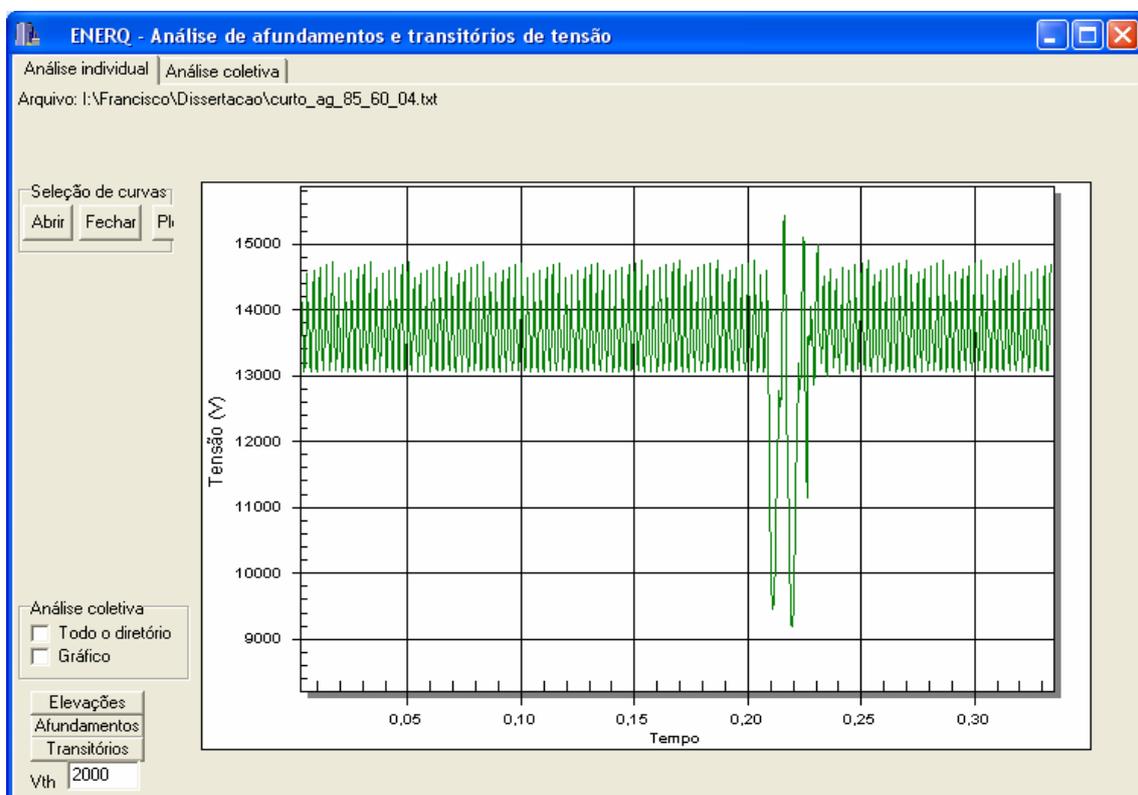


Figura A.21 NEI calculada pelo programa de análise

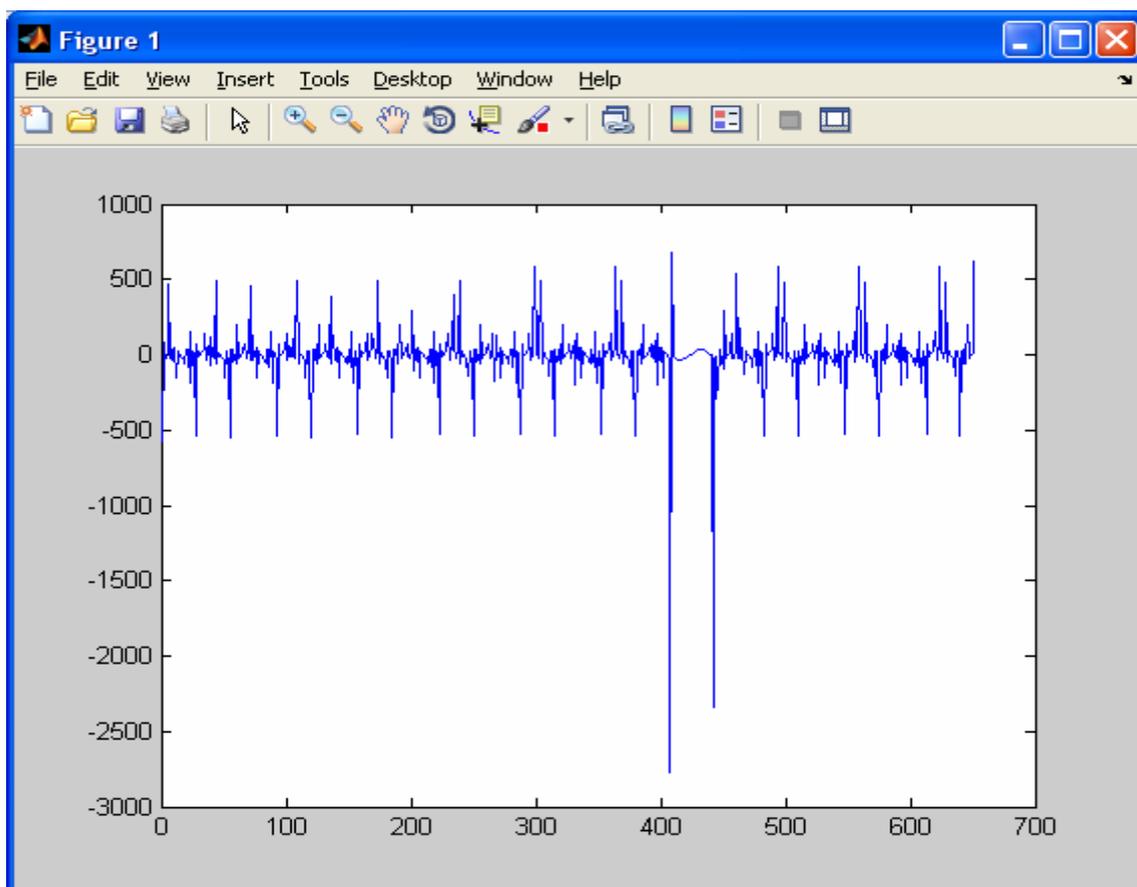


Figura A.22 Primeiro nível de detalhes (DB2) calculados no MatLab

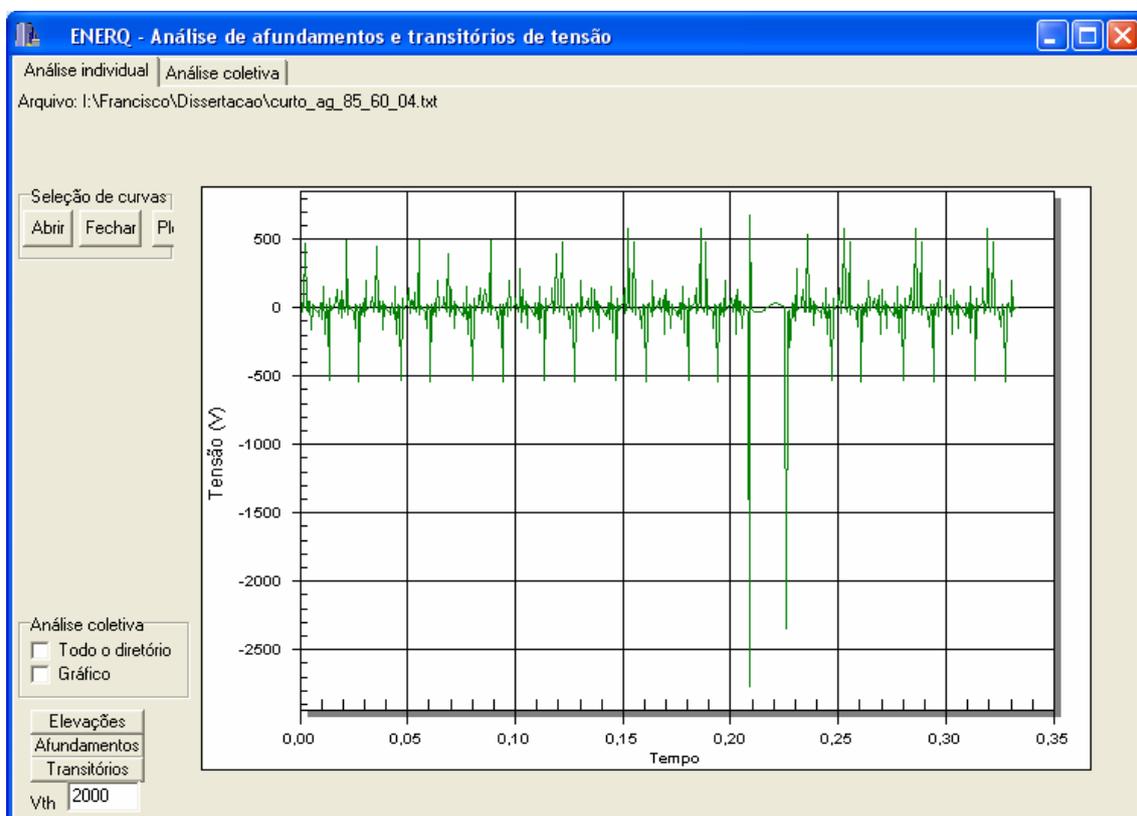


Figura A.23 Primeiro nível de detalhes (DB2) do programa de análise

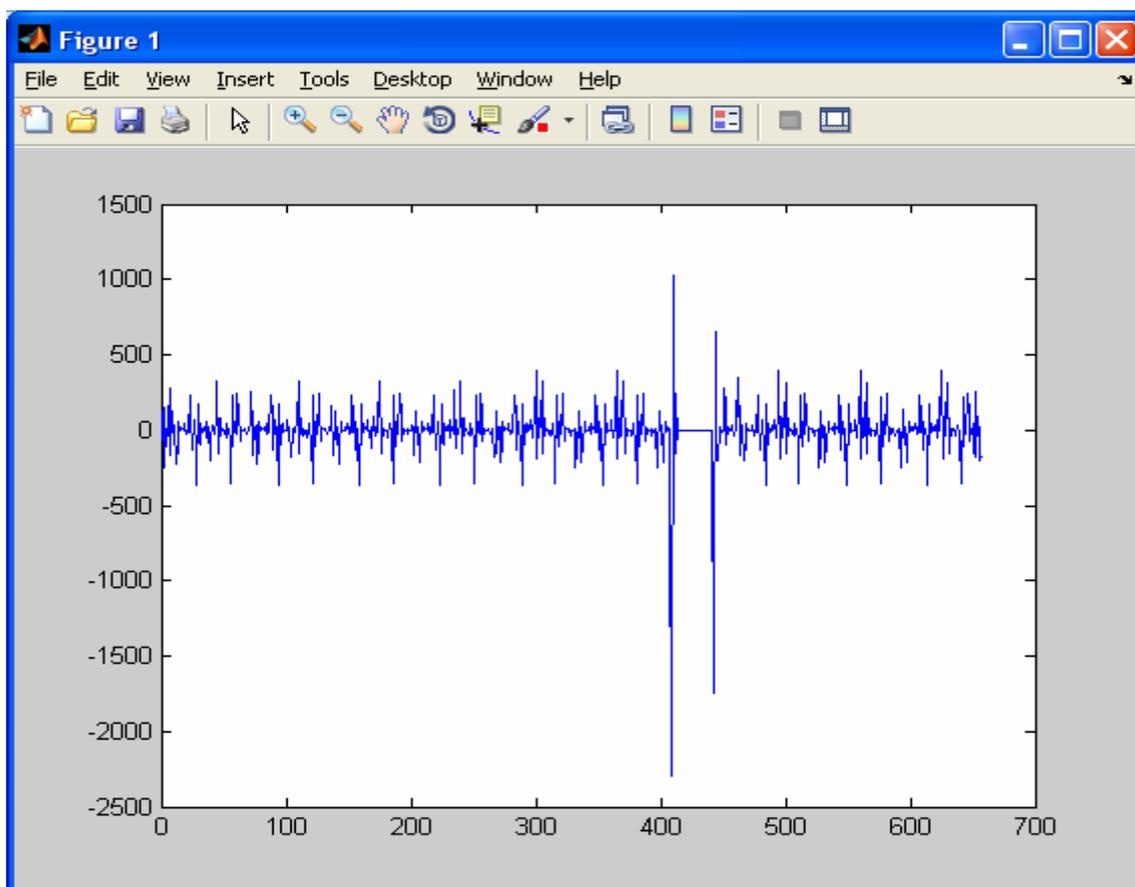


Figura A.24 Primeiro nível de detalhes (DB8) calculados no MatLab

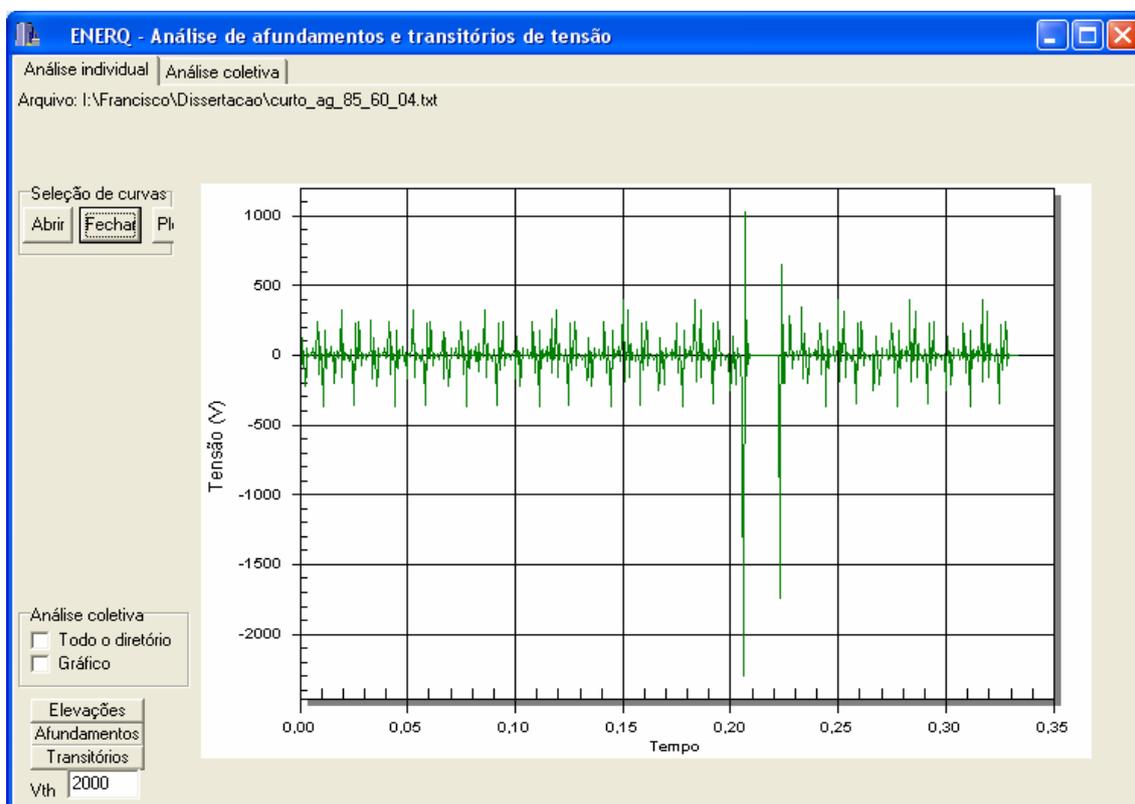


Figura A.25 Primeiro nível de detalhes (DB8) do programa de análise

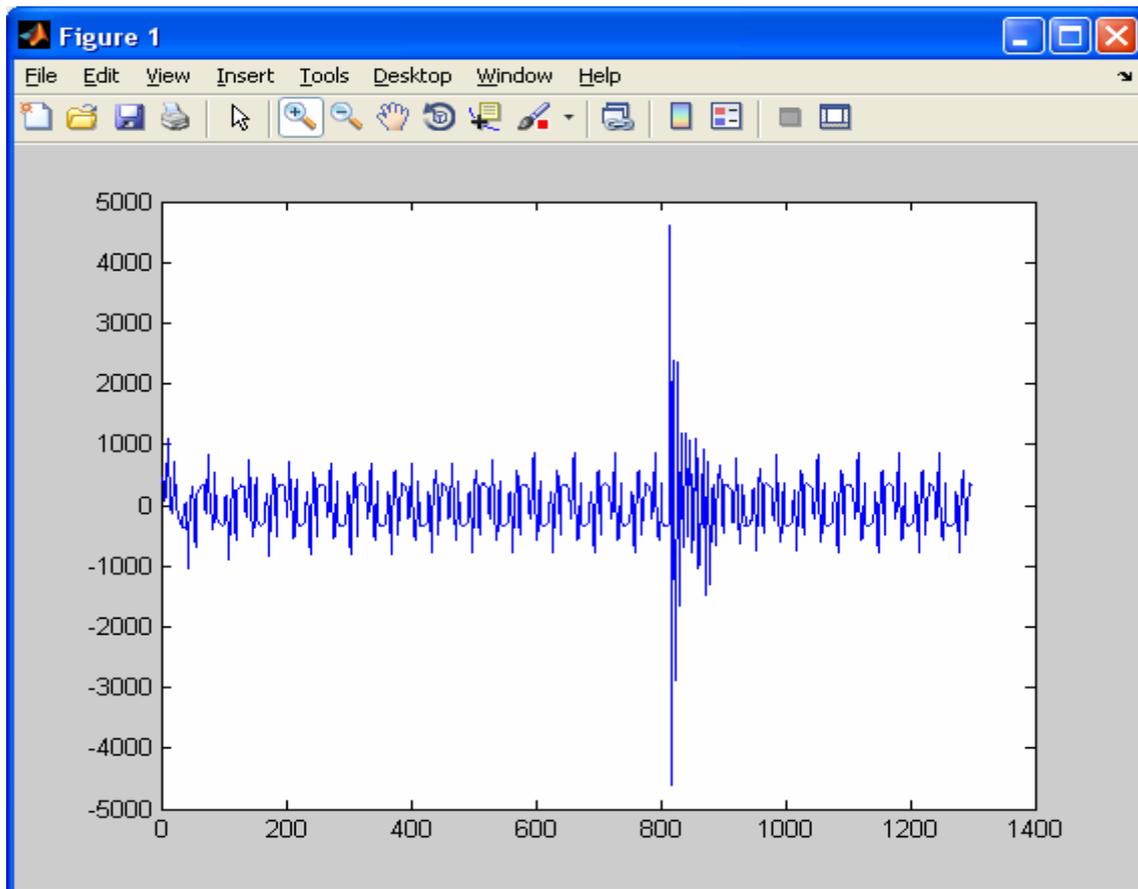


Figura A.26 Componente residual de transitório gerada pelo Simulink

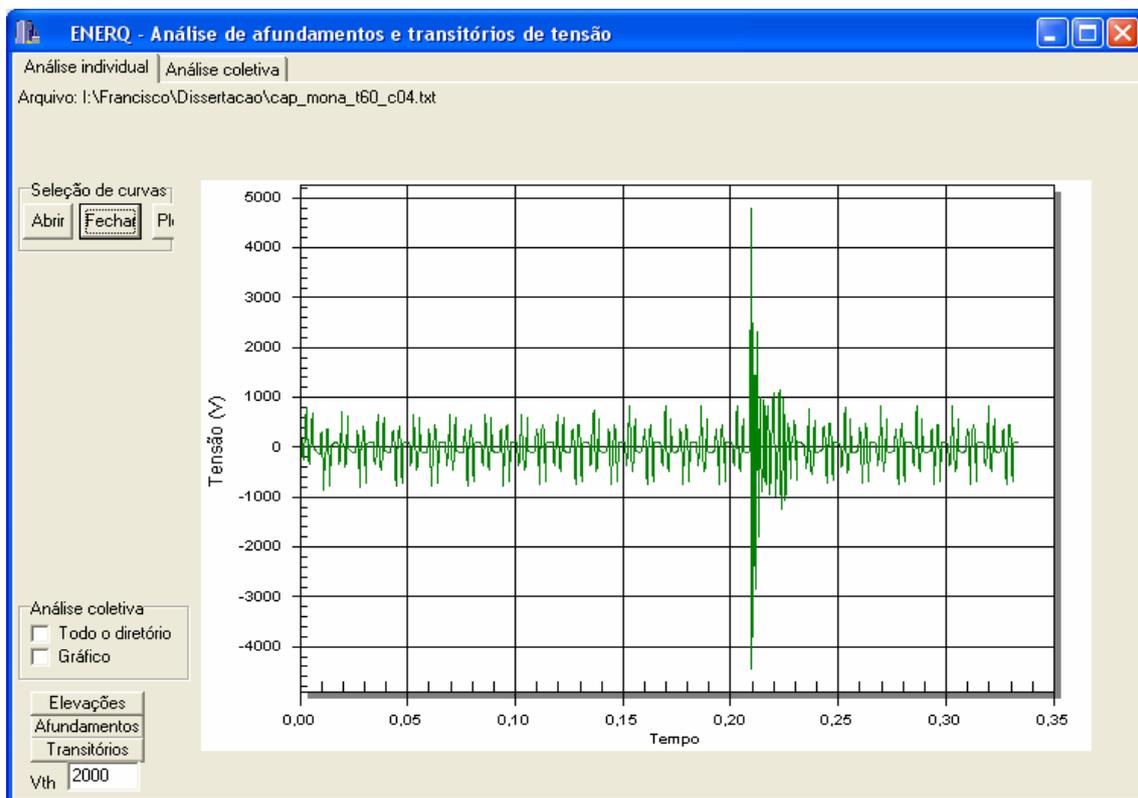


Figura A.27 Residual de transitório calculado no programa de análise