**LETÍCIA CALDEIRA PEREIRA RODRIGUES**

# TÉCNICAS PARA A DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO NO TEMPO DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA E LONGA DURAÇÃO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência
Orientador: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

São Carlos
2008

*À minha Mãe, Aparecida, meus irmãos, Ligia, Liseanne e Leandro, meus sobrinhos(as) Lais, Lucianna, João Pedro e Enzo, ao meu noivo Weliton e sua família, com todo meu amor, carinho e dedicação.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida e pelo trabalho realizado.

Ao Prof. Dr. Mário Oleskovicz, meu orientador, pelos ensinamentos, orientações, incentivo, paciência que muito contribuiu para meu crescimento intelectual e científico.

Aos professores da banca Tit. Denis Vinícius Coury e ao Dr. Paulo José Amaral Serni.

À minha família, minha mãe Aparecida, minhas irmãs Ligia e Liseanne, meu irmão Leandro, minhas sobrinhas Lais e Lucianna, e meus pequenos sobrinhos Enzo e João Pedro, pelo seu apoio, mesmo distante, incentivando-me sempre a crescer e a buscar as minhas realizações. E especialmente ao meu pai, que sempre me mostrou a importância dos estudos, e que hoje acompanha os meus passos em meu pensamento e coração.

Ao meu amado noivo Weliton, pela compreensão dos momentos separados, amor, carinho, ajuda e incentivo para o término deste trabalho.

Em especial, ao meu querido amigo Wesley Fernando Usida, que contribuiu diretamente com suas "idéias geniais", que sempre me atendeu em todos os momentos que precisei e muito me auxiliou no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus companheiros do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica – LSEE, Breno, Daniel, Etienne, Gerson, Hermes, Helson, Lucas, Monaro, Patrick, Ricardo, Sérgio, Silvio, Ulisses, com quem eu pude compartilhar a companhia e conhecimentos essenciais ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica.

Àqueles com quem eu tive oportunidade de morar e que se tornaram grandes amigos e que pretendo sempre tê-los por perto: Carlisson, Rafael, Carol e Lie.

Aos amigos da Nova Unção e da IBA, Luciana, Inara, Raquel, Ariane, Regina, Irene, Lucimar, Giovana, Sueli, Luis Henrique, Juscélia, Nelson, Alberto e Cida que me deram apóio em tudo, principalmente espiritualmente, e que foram a minha família em São Carlos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico, CNPq, pelo apoio financeiro recebido durante todo o trabalho realizado.

*"Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende."*

*(Leonardo da Vinci)*

# RESUMO

RODRIGUES, L. C. P., Técnicas para a detecção, classificação e localização no tempo das variações de tensão de curta e longa duração. São Carlos, 2008, 154p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Os objetivos deste trabalho vão da apresentação do andamento das pesquisas relacionadas à análise de distúrbios associados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), até a proposta de um algoritmo baseado em diversas ferramentas para a detecção e localização no tempo, bem como a classificação automática destes distúrbios. Nesta pesquisa é proposta uma detecção não somente do início e fim de um único evento, mas também, de *n* possíveis desconformidades na forma de onda que possam vir a ocorrer ou existir em determinados registros e/ou arquivos de dados em análise. Como diferencial deste trabalho, tem-se que da determinação da localização das alterações/descontinuidades na forma de onda, foi possível obter janelas de dados com tamanhos flexíveis. Desta maneira, vários eventos sobre o sinal em análise puderam ser avaliados, bem como as durações associadas. Para isso, a Transformada *Wavelet* (TW) foi utilizada para realizar a detecção e também a localização destas alterações no tempo. Já para a classificação da ocorrência, ou das ocorrências, a TW, a Transformada de *Fourier* (TF) e o valor RMS foram empregados. A flexibilidade das janelas de dados permitiu uma adequada escolha de qual ferramenta poderia ser mais bem utilizada na classificação. Conforme implementado, cada uma destas ferramentas apresenta uma resposta e através de um módulo de decisão lógica é determinada a resposta final do algoritmo. Para validar o estudo, várias situações de distúrbios foram caracterizadas referentes a um sistema elétrico de distribuição real, implementado e simulado pela aplicação do *software* ATP (*Alternative Transients Program*). Os resultados obtidos foram excelentes tanto para a detecção e localização no tempo, como para a classificação e estimação da amplitude e duração dos eventos.

Palavras chaves: Sistemas Elétricos de Potência, Qualidade da Energia Elétrica, Variações de Tensão de Curta e Longa Duração, Transformada *Wavelet,* Transformada de *Fourier* Janelada, Valor RMS, software ATP.

# ABSTRACT

RODRIGUES, L. C. P., Techniques for detection, classification and location in time of short and long-time voltage variations. São Carlos, 2008, 154p. Dissertation (master degree) – São Carlos Engineering School, University of São Paulo.

The objectives of this work are going since the presentation of the researches related to the analyses of Power Quality (PQ) disturbances through the proposal of an algorithm based on several tools for detection and location in time, as well as the automatic classification of these phenomena. It is proposed to determine not only the initial and the end of a unique event, but all the *n* possible disconformities in the waveform that can exist or occur in the data file or registered data in analyses. As the differential of this research, from the location in time of the alteration/discontinuities in the waveforms, it was possible to obtain data windows with flexible sizes. So, several events on the signal were evaluated, as well as their specific time-duration. For this purpose, the Wavelet Transform (WT) was used to reach the detection and localization in time of the waveform alterations. For the event classification, the TW, the Fourier Transform (FT) and the Root Mean Square (RMS) value were used. The data window flexibility allowed an appropriate choice of which tool could be better used in the classification task. As implemented, each one of these tools presented an answer, and the final answer was obtained by using a logic decision module. To validate the study, some situations of disturbances were characterized using a real distribution system, implemented and simulated applying the ATP (Alternative Transients Program) software. The results were excellent in such a way for detection and localization in time, as well as for the automatic classification and estimation of the magnitude and the event duration.

Key – Words: Power System, Power Quality, Short and Long-Time Voltage Variation, *Wavelet Transform, Fourier Transform*, RMS Value, *software* ATP.

# LISTA DE FIGURAS

*Figura 1 – Transformada de Fourier Janelada* ..... 55

*Figura 2 – Translação aplicada à wavelet* ..... 56

*Figura 3 – Aplicação do fator de escala em uma função seno.* ..... 57

*Figura 4 – Aplicação do fator escala à wavelet mãe db3* ..... 57

*Figura 5 – Processo de decomposição de um sinal através de filtragem* ..... 60

*Figura 6 – Decomposição do sinal: a) sem aplicação do downsampling e b) com o operador downsampling* . 60

*Figura 7 – Filtragem considerando o operador downsampling de um sinal elétrico ruidoso.* ..... 61

*Figura 8 – Sucessivas decomposições de um sinal elétrico* ..... 61

*Figura 9 – Exemplo de sucessivas decomposições sobre um sinal elétrico* ..... 62

*Figura 10 – Representação da região tempo-escala.* ..... 64

*Figura 11 – Decomposição de um sinal qualquer variável no tempo.* ..... 64

*Figura 12 – Comportamento da wavelet mãe na decomposição do sinal.* ..... 66

*Figura 13 – Da esquerda para a direita: funções wavelet dos filtros wavelets Haar, Daubechies, Vaidyanathan, Beylkin, Coiflet e Symmlet.* ..... 68

*Figura 14 - Fluxograma para a análise dos distúrbios relacionados à QEE.* ..... 72

*Figura 15 - Fluxo da informação na etapa de aquisição e condicionamento dos dados* ..... 74

*Figura 16 – Fluxograma de normalização dos dados* ..... 78

*Figura 17 – a) Sinal elétrico caracterizando um afundamento de tensão na fase A; b) Coeficientes do primeiro nível de detalhe do sinal em análise.* ..... 79

*Figura 18 – Sinal de tensão com presença de uma elevação de tensão.* ..... 80

*Figura 19 - Coeficientes do primeiro nível de detalhe do sinal com afundamento* ..... 81

*Figura 20 – a) Sinal caracterizando um afundamento na fase "A" e b) os coeficientes do primeiro nível de detalhe.* ..... 83

*Figura 21 – Faixas utilizadas na etapa de classificação com a) o Valor RMS; b) TRF e c) TWD.* ..... 85

*Figura 22 – Fluxograma para a classificação dispondo do valor RMS para os eventos pré-classificados como (a) VTCD e (b) VTLD* ..... 86

***Figura 23 – Fluxograma para a classificação dos fenômenos pelo emprego da TRF, para os pré-classificados como VTCD caracterizados por (a) uma janela de dados de um ciclo e (b) por uma janela maior do que dois.*** ..... *89*

***Figura 24 – Fluxograma para a classificação com a TRF para os eventos pré-classificados como (a) DFO e (b) VTLD*** ..... *92*

***Figura 25 – Fluxograma para a classificação dos distúrbios dispondo da TW para os pré-classificados como VTCD.*** ..... *93*

***Figura 26 – Fluxograma para a classificação das ocorrências dispondo da TW para os pré-classificados como DFO.*** ..... *94*

***Figura 27 – Fluxograma para a classificação das ocorrências dispondo da TW para os pré-classificados como VTLD.*** ..... *95*

***Figura 28 – Fluxograma para o módulo de decisão lógico*** ..... *96*

***Figura 29 – Exemplo de relatório de texto gerado quando da aplicação por completa do algoritmo proposto.*** *99*

***Figura 30 – Diagrama do sistema elétrico de distribuição real analisado.*** ..... *101*

***Figura 31 – Representação do sistema elétrico de distribuição real pelo software ATPDraw 5.0.*** ..... *102*

***Figura 32 – Caso 1: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de tensão 0,81 p.u e b) elevação de tensão de 1,11 p.u*** ..... *114*

***Figura 33 – Caso 2: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de 0,74 p.u e b) elevação de tensão de 1,18 p.u.*** ..... *114*

***Figura 34 – Caso 3: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de 0,74 p.u e b) elevação de tensão de 1,17 p.u.*** ..... *115*

***Figura 35 – Caso 4: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de 0,77 p.u e b) elevação de tensão de 1,15 p.u.*** ..... *115*

***Figura 36 – Caso 5: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de 0,77 p.u e b) elevação de tensão de 1,19 p.u.*** ..... *115*

***Figura 37 – Caso 6: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de 0,74 p.u e b) elevação de tensão de 1,17 p.u.*** ..... *116*

***Figura 38 – Caso 7: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de 0,83 p.u e b) elevação de tensão de 1,11 p.u.*** ..... *116*

*Figura 39 – Caso 8: falta aplicada com resistência de 0,01 Ω e ângulo de incidência de 90º. a) afundamento de 0,29 p.u e b) elevação de tensão de 1,27 p.u.* ..... 116

*Figura 40 – Caso 9: falta aplicada com resistência de 0,01Ω e ângulo de incidência de 90º. a) afundamento de 0,49 p.u e b) elevação de tensão de 1,21 p.u.* ..... 117

*Figura 41 – Caso 10: falta aplicada com resistência de 0,01Ω e ângulo de incidência de 90º. a) afundamento de 0,71 p.u e b) elevação de tensão de 1,13 p.u.* ..... 117

*Figura 42 – Instantes iniciais para os casos de elevação de tensão inseridos à 0º.* ..... 121

*Figura 43 – Instantes iniciais para os casos de elevação de tensão inseridos à 90º.* ..... 121

*Figura 44 – Instantes iniciais para os casos de afundamento de tensão inseridos à 0º.* ..... 122

*Figura 45 – Instantes iniciais para os eventos de VTLD inseridos à 0º e medidos na fase A.* ..... 122

*Figura 46 – Final dos eventos para os casos de elevação momentânea à 90°.* ..... 124

*Figura 47 – Final dos eventos para os casos de afundamento temporário à 0°.* ..... 125

*Figura 48 – Final dos eventos para os casos de subtensão.* ..... 125

*Figura 49 – Porção do sinal em análise que caracteriza uma oscilação transitória quando do instante do distúrbio* ..... 128

*Figura 50 – Porção do sinal em análise que caracteriza o instante final do distúrbio* ..... 128

*Figura 51 – Amplitudes para os 53 casos de afundamento analisados.* ..... 130

*Figura 52 – Amplitudes para os 26 casos de interrupção de tensão analisados.* ..... 130

*Figura 53 – Amplitudes para os 77 casos de elevação de tensão analisados.* ..... 130

*Figura 54– Representação do sistema elétrico de distribuição no software ATPDraw 5.0* ..... 147

# LISTA DE TABELAS

***Tabela 1 – Representação dos coeficientes no plano tempo-freqüência.*** ..... *65*

***Tabela 2 – Dados dos transformadores particulares.*** ..... *103*

***Tabela 3 – Dados dos transformadores de distribuição.*** ..... *103*

***Tabela 4 – Interrupções de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra no lado de baixa do transformador na subestação.*** ..... *105*

***Tabela 5 – Interrupções de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra na alta do transformador T13*** ..... *106*

***Tabela 6 – Afundamentos de tensão obtidos através da aplicação de falta fase-terra no secundário do transformador da subestação.*** ..... *106*

***Tabela 7 – Afundamentos de tensão obtidos através da aplicação de falta fase-terra no lado de alta do transformador T13, sendo a leitura dos dados efetuada na subestação.*** ..... *107*

***Tabela 8 – Afundamentos de tensão obtidos através da aplicação de falta fase-terra no ponto Ch1.*** ..... *107*

***Tabela 9 – Afundamentos de tensão obtidos através da aplicação de falta fase-terra no lado de alta do transformador T13 e leitura dos dados no mesmo.*** ..... *108*

***Tabela 10 – Afundamentos de tensão obtidos através da aplicação de falta fase-terra no ponto TP1.*** ..... *109*

***Tabela 11 – Elevações de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra no lado de alta do transformador T13 e leitura dos dados na subestação.*** ..... *109*

***Tabela 12 – Elevações de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra no lado de alta do transformador T13 e leitura dos dados no local.*** ..... *110*

***Tabela 13 – Elevações de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra no ponto Ch1*** ..... *110*

***Tabela 14 – Elevações de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra no secundário do transformador da subestação*** ..... *111*

***Tabela 15 – Elevações de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra no ponto TP1.*** ..... *112*

***Tabela 16 – Quantidade de casos simulados para VTCD.*** ..... *112*

***Tabela 17 – Resultados da detecção do início das alterações da forma de onda.*** ..... *123*

***Tabela 18 – Relação e descrição dos componentes empregados no decorrer das simulações realizadas.*** ..... *148*

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| **AG** | Algoritmo Genético |
| **AMR** | Análise Multiresolução |
| **ANEEL** | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| **ASCII** | *American Standard Code for Information Interchange* |
| **ATP** | *Alternative Transients Program* |
| **cA** | Coeficiente de Aproximação |
| **CAD** | Conversor Analógico Digital |
| **cD** | Coeficiente de Detalhe |
| **CLF** | Combinação Linear de Fourier |
| **COMTRADE** | *Common Format for Transient Data Exchange for Power System* |
| **DEC** | Duração Equivalente de interrupção por unidade Consumidora |
| **DFO** | Desconformidade da Forma de Onda |
| **DIC** | Duração de interrupção Individual por unidade Consumidora |
| **DMIC** | Duração Máxima de Interrupção contínua por unidade Consumidora |
| **DHT** | Distorção Harmônica Total |
| **EMTP** | *Electromagnetic Transients Program* |
| **FEC** | Freqüência Equivalente de interrupção por unidade Consumidora |
| **FIC** | Freqüência de interrupção Individual por unidade Consumidora |
| **IEEE** | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| **LVQ** | Learning Vector Quantization |

| | |
|---|---|
| **PMC** | Perceptron Multi Camadas |
| **ProDist** | Procedimentos de Distribuição |
| **QEE** | Qualidade da Energia Elétrica |
| **QMF** | Quadrature Mirror Filter |
| **RMS** | Root Mean Square |
| **SEP** | Sistema Elétrico de Potência |
| **SF** | Sistema Fuzzy |
| **TF** | Transformada de Fourier |
| **TFJ** | Transformada de Fourier Janelada |
| **TRF** | Transformada Rápida de Fourier |
| **TW** | Transformada Wavelet |
| **TWC** | Transformada Wavelet Continua |
| **TWD** | Transformada Wavelet Discreta |
| **TWP** | Transformada Wavelet Packet |
| **VTCD** | Variação de Tensão de Curta Duração |
| **VTLD** | Variação de Tensão de Longa Duração |

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO ..... 25

1.1 Fenômenos elétricos associados à QEE contemplados ..... 29

1.1.1 Variação de Tensão de Curta Duração – VTCD ..... 30

1.1.2 Variação de Tensão de Longa Duração - VTLD ..... 31

1.1.3 Transitório ..... 32

1.1.4 Ruídos ..... 33

1.2 Organização do trabalho. ..... 33

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 35

2.1 Detecção, localização e classificação dos fenômenos relacionados à qualidade da energia elétrica ..... 35

3. FERRAMENTAS UTILIZADAS ..... 53

3.1 O valor RMS ..... 53

3.2 A Transformada de Fourier Janelada ..... 54

3.3 A Transformada Wavelet ..... 55

3.3.1 A Transformada Wavelet Contínua ..... 56

3.3.1.1 Fator de translação ..... 56

3.3.1.2 Fator de Escala ..... 57

3.3.2 A Transformada Wavelet Discreta ..... 58

3.3.3 A Análise Multiresolução ..... 59

3.3.4 Energia do sinal ..... 66

3.4 Estudo da *Wavelet* mãe utilizada no algoritmo ..... 67

4. ALGORITMO PROPOSTO ..... 71

4.1 Visão geral do projeto ..... 71

4.1.1 Módulo de aquisição e condicionamento dos sinais ..... 73

4.1.1.1 O arquivo COMTRADE ..... 74

4.1.1.2 Filtragem do sinal ..... 77

4.1.1.3 Digitalização do sinal. ..... 77

4.1.1.4 Normalização do sinal. ..... 77

4.1.2 Módulo de detecção e localização no tempo das alterações na forma de onda ..... 78

4.1.3 Módulo de determinação da duração das descontinuidades ..... 83

4.1.4 Módulo de pré-classificação ..... 84

4.1.5 Módulo de Classificação ..... 85

4.1.5.1 Classificação via valor RMS ..... 85

4.1.5.2 Módulo de Classificação via TRF ..... 87

4.1.5.3 Classificação via TWD ..... 91

4.1.6 Módulo de Decisão lógica ..... 96

4.1.7 Relatório Técnico ..... 98

5. SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO ..... 101

5.1 Situações de faltas simuladas sobre um primeiro e distinto alimentador de um sistema de distribuição real ..... 104

5.2 Disponibilização de dados de um segundo e distinto sistema de distribuição real ..... 113

6. TESTES E RESULTADOS OBSERVADOS ..... 119

6.1 Detecção e localização das alterações da forma de onda no sinal ..... 120

6.2 Determinação da duração dos eventos ..... 125

6.3 Pré-classificação dos distúrbios com relação ao tempo ..... 126

6.4 Classificação final dos eventos ..... 127

6.5 Amplitude ..... 129

6.6 Resultados sobre as situações de faltas geradas no ATP para a validação do algoritmo dispondo do segundo e distinto sistema de distribuição real ..... 131

6.7 Comentários parciais e divulgação dos resultados encontrados ..... 132

7. CONCLUSÕES E CONTINUIDADE DO TRABALHO ..... 137

8. REFERÊNCIAS ..... 141

APÊNDICE A – Guia dos componentes utilizados via ATPDraw. ..... 147

APÊNDICE B – Arquivo de entrada gerado pelo ATPDraw ..... 149

# 1. INTRODUÇÃO

O atual contexto do Sistema Elétrico de Potência (SEP) é caracterizado por uma rede elétrica sujeita a vários níveis de distorção que deterioram a qualidade no fornecimento da energia elétrica.

Como fato, tem-se que com o desenvolvimento da eletrônica de potência ao longo dos anos, as cargas passaram a ser mais sensíveis a estes distúrbios, e, conseqüentemente, a exigir uma energia elétrica de maior qualidade. Cabe frisar que as cargas não lineares são também, em grande parte, as causadoras de distúrbios relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Estas cargas estão cada vez mais comuns nos diversos setores (industrial, comercial e residencial) e em decorrência, o nível da QEE requerido tem aumentado muito nos últimos anos.

Por definição, a QEE está relacionada com qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou freqüência da tensão e/ou corrente elétrica em um SEP [1]. Uma definição direta pode ser relacionada ao funcionamento adequado dos equipamentos, das cargas e dos próprios sistemas de potência, não significando necessariamente em uma energia isenta de qualquer divergência da forma de onda puramente senoidal.

A busca por esta qualidade passou a ser preocupação de consumidores, agentes e empresas do setor elétrico nacional.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão regulador e fiscalizador no Brasil, ciente da importância da qualidade da energia elétrica publicou resoluções exigindo das empresas concessionárias, indicadores de qualidade no fornecimento de energia, evidenciando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. Diante destes fatos, as concessionárias precisaram cada vez mais manter os níveis de tensão dentro de certos limites operacionais aceitáveis pré-estabelecidos.

Conforme encontrado na literatura [2], a qualidade do setor elétrico de distribuição pode ser avaliada pelo desempenho das concessionárias no fornecimento de energia elétrica, respeitando-se os seguintes parâmetros: a conformidade, o atendimento ao consumidor e a continuidade. Em poucas e diretas palavras, a *conformidade* está relacionada com os fenômenos ligados à forma de onda da tensão. Já o *atendimento ao consumidor*, relacionado à relação comercial entre as partes (concessionárias e o consumidor), e a *continuidade*, correspondente ao grau de disponibilidade de energia ao consumidor.

Com relação à continuidade, as concessionárias são avaliadas pela ANEEL através dos indicadores de desempenho, em função da Resolução nº 024 [3]. Por esta resolução, os indicadores adotados são separados em índices coletivos e individuais. Os indicadores coletivos são: DEC (Duração Equivalente de interrupção por unidade Consumidora) e FEC (Freqüência Equivalente de interrupção por unidade Consumidora). Entre os individuais, tem-se: DIC (Duração de interrupção Individual por unidade Consumidora), FIC (Freqüência de interrupção Individual por unidade Consumidora) e DMIC (Duração Máxima de Interrupção continua por unidade Consumidora). Cabe comentar, que através dos indicadores coletivos a agência reguladora pode avaliar as concessionárias, e com os indicadores individuais, os consumidores podem acompanhar e avaliar o seu atendimento junto à distribuidora.

Quanto à conformidade da tensão, a ANEEL, através da Resolução n º 505 [4], estabelece indicadores de desempenho para avaliar as concessionárias em situação de regime per-

manente. Já com base na Resolução nº 024, no que diz respeito à conformidade, os indicadores são divididos em individual e coletivo. Os indicadores individuais são: Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária (DRP) e Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica (DRC). O indicador coletivo é apontado pelo Índice de Unidades Consumidoras com Tensão Crítica (ICC).

Contudo, como observado anteriormente, os indicadores apresentados nas duas resoluções não são aplicados para as alterações da forma de onda e na freqüência, tais como, por exemplo, os harmônicos, as flutuações de tensão, as distorções e ruídos, que tanto influenciam na QEE.

Recentemente, a ANEEL trabalha na elaboração de documentos denominado Procedimentos de Distribuição (ProDist) com a intenção de centralizar todos os aspectos de regulação a serem seguidos pelas empresas concessionárias e permissionárias de serviços de distribuição de energia elétrica. O ProDist está dividido em oito módulos, sendo o último direcionado aos aspectos relacionados à QEE. Neste módulo que recebe a numeração oito, a QEE é divida em qualidade de produto e qualidade de serviço [5].

Na seção referente à qualidade do produto, o ProDist define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão. Os itens considerados nesta seção são: tensão de regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação da freqüência. Quanto à qualidade dos serviços prestados, este módulo estabelece a metodologia para a apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento às ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades [5].

Cabe frisar que estas resoluções, principalmente o ProDist, buscam observar três principais fatores principais com relação à tensão no contexto de QEE [1]:

a. a proximidade da forma de onda à onda senoidal;

b. a simetria do sistema elétrico e

c. os limites aceitáveis das magnitudes da tensão.

Contudo, ressalta-se, que existem situações típicas de distúrbios e/ou fenômenos em que os dispositivos eletrônicos, sensíveis ou não, estão constantemente expostos. Na prática, estas situações podem ser ocasionadas por energizações dos sistemas, manobras rotineiras de operação, faltas sustentadas, correntes de partida de grandes motores ou ainda pelos efeitos capacitivos e de chaveamento em linhas de transmissão, entre outras causas.

De uma maneira em geral, conforme apontado na literatura existe dois grandes grupos nos quais os distúrbios de QEE podem ser enquadrados [6]: o grupo das variações e o grupo de eventos. As variações são distúrbios de regime permanente que permitem monitoramento contínuo, como por exemplo, a flutuação de tensão, variações na freqüência do sistema, distorções na forma da onda, etc. Já os eventos são distúrbios súbitos que possuem início e fim. Entre eles temos as variações de tensão de curta duração (VTCD) e as de longa duração (VTLD), etc. As variações e os eventos podem ser divididos/agrupados em categorias de acordo com o seu tempo de duração (permanência sobre os sinais em análise), sua amplitude típica e seu conteúdo espectral [1]. A ênfase deste trabalho será nos fenômenos associados às VTCD e VTLD.

Como conseqüência frente a estes problemas, as formas de onda das correntes e/ou tensões trifásicas da rede elétrica desviam das suas formas senoidais, sendo necessária, a detecção e identificação correta dos mesmos para que se possam entender as suas causas e seus impactos sobre o SEP como um todo. Para estes propósitos, são utilizadas diversas técnicas de processamento de sinais para análise de tais distúrbios. As técnicas mais empregadas passam pela Transformada de *Fourier* (TF), o cálculo do valor RMS (*Root Mean Square*), a Transformada *Wavelet* (TW, Análise Multiresolução - AMR) e as técnicas de inteligência computa-

cional. Cabe adiantar, que cada uma destas ferramentas apresenta suas limitações frente ao contexto de QEE, fazendo-se com que o uso individual das mesmas não permita um estudo completo das características de muitos dos distúrbios de interesse. Por exemplo, pela aplicação individual da TF, não se consegue ter uma boa resolução na análise local do conteúdo da freqüência, assim como, resultados não condizentes com o esperado pela aplicação da TW, quando o sinal em análise contiver muito ruído. Diante do apresentado, uma solução para este problema seria a combinação das diversas técnicas, aproveitando-se das potencialidades inerentes a cada uma.

Cabe adiantar que nesta pesquisa será aplicada a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD), através da AMR, para a detecção e localização de todos os eventos de curta e longa duração associados à QEE. Já para a classificação dos mesmos, será desenvolvida e apresentada uma lógica dispondo de uma combinação de algumas das ferramentas citadas (TF, TW e o cálculo do valor RMS).

## 1.1 Fenômenos elétricos associados à QEE contemplados

Como mencionado anteriormente, os fenômenos elétricos podem ser divididos em categorias de acordo com o seu tempo de permanência (duração) sobre o sinal, sua amplitude típica e seu conteúdo espectral. Neste reporte, a ênfase dada será nos distúrbios associados à VTCD e VTLD, posteriormente verificando a ocorrência de oscilações transitórias e ruídos. A seguir têm-se uma breve descrição destes distúrbios que habitualmente ocorrem nos SEP, de acordo com observações colocadas por [1] e [7].

### 1.1.1 Variação de Tensão de Curta Duração – VTCD

As variações de tensão de curta duração podem ser caracterizadas por alterações instantâneas (0,5 ciclo a 30 ciclos), momentâneas (30 ciclos a 3 s) ou temporárias (3 s a 1 min.), dependendo da duração do fenômeno. No Brasil, quando da aprovação do ProDist, as variações de curta duração serão somente classificadas em dois grupos: momentâneas (de 1 ciclo a 3 s) ou temporárias (3s a 1 min.). Por estas, a classificação momentânea englobará a instantânea anteriormente citada. Para esta pesquisa serão considerados os valores definidos para o SEP brasileiro, conforme regerá o ProDist.

Cabe adiantar que estas variações de tensão são, comumente, causadas por condições de faltas, energização de grandes cargas que necessitam de altas correntes de partidas, ou perda intermitente de conexões nos cabos no sistema. Dependendo da localização e da condição do sistema, a falta pode causar um afundamento, uma elevação ou a interrupção total da tensão.

- **Afundamento de tensão:** é caracterizado por uma rápida redução no valor eficaz da tensão, igual ou superior a 10% e inferior a 90%, com duração entre 1 ciclo e 1 minuto, na freqüência fundamental do sistema. Os afundamentos são causados em geral por faltas e energização de grandes cargas ou grandes motores e pela corrente de magnetização dos transformadores. Os afundamentos também podem ser classificados em duas categorias dependendo da sua duração, conforme anteriormente apontado. Estes tempos de permanência normalmente correspondem ao tempo de operação dos dispositivos de proteção das concessionárias. Estas duas categorias em função da duração também são aplicadas para os casos de elevação e interrupção de tensão.

- **Elevação de tensão:** é caracterizada por um aumento superior a 10 e inferior a 80% no valor eficaz da tensão (na freqüência fundamental do sistema), por um período su-

perior a 1 ciclo e inferior a 1 minuto. Assim como os afundamentos de tensão, as elevações também são associadas às condições de faltas no sistema, principalmente no que diz respeito a curto-circuito fase terra, visto que nesta situação, as fases sãs do circuito experimentam uma elevação de tensão. Este fenômeno também pode ser ocasionado pela saída de grandes cargas e energização de grandes bancos de capacitores. Porém, com uma incidência muito menor se comparado com as elevações oriundas das faltas fase-terra nas redes de transmissão e distribuição de energia.

- **Interrupção de tensão:** é definida quando a tensão eficaz do sistema, freqüência de 60 Hz, decresce para um valor inferior a 10% por um período de até 1 minuto. Normalmente é causada por faltas no sistema de energia, falhas nos equipamentos e mau funcionamento do sistema de controle. A duração da interrupção é determinada pelo tempo de operação dos dispositivos de proteção, os quais dependem da filosofia adotada.

### 1.1.2 Variação de Tensão de Longa Duração - VTLD

As variações de tensão de longa duração são desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão, na freqüência do sistema, com duração superior a 1 minuto.

Estas variações de tensão podem denotar uma situação de interrupção sustentada, sobretensão ou subtensão. Todas estas variações são normalmente causadas por variações na carga e ou operações de chaveamento sobre o sistema [1] e [7].

- **Interrupção sustentada:** é caracterizada quando o valor eficaz da tensão permanece em zero por um intervalo de tempo superior a 1 minuto. Normalmente, as interrupções sustentadas são de caráter permanente e há a necessidade de intervenção da concessionária para reparar o sistema e restaurar o fornecimento de energia.

- **Sobretensão:** é descrita como um acréscimo superior a 110% (normalmente entre 110 e 120%) da tensão eficaz por um período de duração superior a 1 minuto. As sobretensões podem ser ocasionadas devido à saída de grandes cargas ou energização de banco de capacitores. Além disto, transformadores com *taps* conectados erroneamente também podem causar sobretensões.

- **Subtensão:** é definida como um decréscimo inferior a 90% da tensão eficaz por um intervalo de tempo superior a 1 minuto. As subtensões são ocasionadas, principalmente, pelo aumento excessivo de cargas nos circuitos alimentadores. Fora isto, a saída de banco de capacitores e a conexão de grandes cargas no sistema elétrico também podem causar subtensão.

### 1.1.3 Transitório

Das condições operativas dos sistemas elétricos de potência, estes estão freqüentemente submetidos a distúrbios transitórios. Conforme a literatura [1] e [7], na engenharia elétrica os transitórios são definidos como eventos indesejáveis, mas momentâneos. De forma geral, podem ser classificados em duas categorias: transitórios impulsivos e transitórios oscilatórios.

- **Transitório Impulsivo:** os transitórios impulsivos são eventos de curta duração, caracterizando uma súbita alteração nas formas de ondas da tensão e/ou corrente quando comparadas as de regime permanente. Sua polaridade é unidirecional (primeiramente positiva ou negativa). Devido à alta freqüência, este transitório é amortecido rapidamente em decorrência das características inerentes ao sistema elétrico. Desta maneira, o mesmo, não se propaga muito além do seu ponto de geração. As principais causas destes transitórios são as de origem atmosféricas [7].

- **Transitório Oscilatório:** um transitório oscilatório consiste de uma tensão ou corrente, cujo valor instantâneo muda de polaridade rapidamente. Normalmente são causados por reações a transitórios impulsivos ocorridos, energização de banco de capacitores e transformadores, manobras em linhas de transmissão, entre outros. No tocante a pesquisa, serão analisados os transitórios oscilatórios de baixa freqüência. Tais transitórios são caracterizados por oscilações na tensão, cuja freqüência é inferior a 5 kHz, com duração de 0,3 a 50 ms e amplitude máxima de 2 p.u..

### 1.1.4 Ruídos

De acordo com Dugan [1], ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com freqüências menores que 200 kHz, as quais são sobrepostas às tensões e correntes de fase, ou encontradas no condutor neutro.

Os ruídos podem ser causados por circuitos de controle, fontes chaveadas, equipamentos eletrônicos, e normalmente estão associados com aterramentos impróprios.

## 1.2 Organização do trabalho.

Para um melhor acompanhamento do que será apresentado neste documento, tem-se no Capítulo 2, a revisão bibliográfica, a qual se reporta as publicações mais significativas referentes aos métodos de detecção, localização e classificação de distúrbios relacionados à QEE. Para o Capítulo 3, têm-se os conceitos básicos sobre as técnicas/ferramentas empregadas. No Capítulo 4, o algoritmo e/ou lógica computacional implementada. No Capitulo 5 será apresentado o sistema de distribuição simulado e utilizado para a formatação de um banco de dados condizente com o encontrado na prática, em termos dos fenômenos associados à QEE

No Capitulo 6, os testes e resultados observados serão reportados. Para o Capítulo 7, as conclusões e continuidade da pesquisa serão comentadas. Finalizando, o Capítulo 8 traz as referências bibliográficas.

# 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 Detecção, localização e classificação dos fenômenos relacionados à qualidade da energia elétrica

Nas principais bases científicas são encontradas diversas investigações concernentes a métodos de detecção, localização e classificação de fenômenos ligados à QEE. Para a detecção e localização existem diversas técnicas, entre estas se destacam as de processamento de sinais, como por exemplo, a TF, o cálculo do valor RMS e a TW. Com relação à classificação, são utilizadas técnicas de processamento de sinais, de inteligência computacional, a combinação de duas ou mais das técnicas anteriormente citadas, entre outras.

Esse capítulo apresenta os trabalhos mais relevantes na área de QEE que se utilizam destas ferramentas para a detecção, localização e classificação dos fenômenos ligados a QEE.

Em Santoso *et al.*[8] é apresentada uma abordagem para detectar, localizar e investigar a viabilidade de classificar os diversos tipos de distúrbios de QEE utilizando a TW. Neste trabalho é utilizada a decomposição de um dado sinal distorcido em outros sinais que representam uma versão de aproximação (contendo as baixas freqüências) e uma versão de detalhes (contendo as altas freqüências) do sinal original. A decomposição é realizada usando a

técnica de Análise Multiresolução (AMR), com a Daubechies – 4 (db4) como *wavelet* mãe. Como a detecção dos eventos é feita com os coeficientes de detalhe do primeiro nível, a escolha desta *wavelet* mãe é de grande interesse, pois a mesma tem um suporte mais compacto, ideal para analisar detalhes que variam rapidamente. Para testar o algoritmo, os distúrbios aplicados foram registrados em dois diferentes pontos de um centro comercial em Manhattan nos Estados Unidos, durante um intervalo de dois meses. O sinal analisado foi decomposto até o quarto nível pela AMR, sendo a detecção e a localização do distúrbio realizada no primeiro nível de detalhe. Os autores também descrevem um possível esquema de classificação dos distúrbios, utilizando o quadrado dos coeficientes da TW, para extrair as características dos sinais distorcidos.

Lee *et.al.* [9] apresentam uma técnica para caracterizar a extração do vetor característico para a classificação automática dos distúrbios de QEE. Para a detecção é empregada uma combinação de duas técnicas. Para detectar e caracterizar os distúrbios de alta freqüência utilizou-se da Transformada *Wavelet* Discreta (TWD), com a *wavelet* mãe db4. Já para os distúrbios em baixa freqüência, utilizou-se da estimação do sinal elétrico descrito pela seguinte expressão:

$$P(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=n}^{n+N-1} x^2(k) \qquad n = 0,1,2... \tag{1}$$

Onde:

$N$ é o numero de pontos incluídos em um período;

$x(k)$ é função do sinal e

$P$ é a energia do sinal em um período.

Desta forma, o sinal elétrico é estimado adaptativamente, ponto a ponto, sendo que uma mudança repentina dessa estimativa indicaria a ocorrência do distúrbio. Após a detecção, o vetor característico é obtido. Este é composto pelos coeficientes da TWD e pela energia do

sinal. Foram aplicadas também a Transformada Rápida de *Fourier* (TRF) e técnicas de compressão de dados para melhorar o desempenho da classificação. Para validar o processo de classificação, sete classes de distúrbios com ruído Gaussiano branco foram geradas dispondo do *software* EMTP (*Electromagnetic Transients Program* [10]). As classes investigadas foram: afundamentos, elevações, interrupções, distorções harmônicas, oscilações transitórias e impulsivas e desequilíbrios da forma de onda. Dos casos testados, 97,1% foram corretamente reconhecidos quando empregada uma rede *Perceptron Multi Camada* (PMC) como classificador. O foco deste trabalho permaneceu na eficiência do algoritmo de extração dos vetores característicos e não no algoritmo de classificação.

Kopparapu e Chandrasekaran [11] apresentam um estudo sobre a aplicação da TWD como ferramenta de detecção e classificação de distúrbios relacionados à QEE. Para a detecção dos distúrbios, utilizou-se de funções da família *Daubechies* como *wavelet* mãe. Para os casos de chaveamento e transitórios impulsivos, simulou-se o chaveamento de duas fontes sobre o sistema. Para estes casos, foi empregada a decomposição do sinal no primeiro e/ou segundo nível, para a detecção dos mesmos. Já para os casos de afundamento, elevação e ruídos, o sinal foi decomposto em mais níveis, obtendo-se maiores informações do evento. Após a detecção, os autores calcularam o valor RMS e a curva de desvio padrão em cada nível do sinal em análise, de modo que, estes valores, pudessem ser usados como parâmetros para a classificação dos distúrbios pelos sistemas especialistas.

Brito *et al*. [12] investigaram qual seria a melhor *wavelet* mãe da família *Daubechies* para a detecção de distúrbios de QEE. Neste trabalho, os autores utilizaram três tipos de *wavelets*, a saber: db4, db12 e db20. Foi apresentado que a maior diferença entre estas três *wavelets* é devida, principalmente, ao comprimento diferente dos filtros que definem as funções w*avelet* e *scaling*. Os seus tamanhos são: 4, 12 e 20 coeficientes, respectivamente. Devido à *wavelet* db4 ser a que possui menor comprimento, esta possui uma melhor representação no tempo.

Como teste, os mesmos utilizaram sinais (vetores com 1024 amotras) obtidos a partir de medições executadas em um sistema da Companhia Energética de São Paulo (CESP). Estes sinais foram decompostos até o 4º nível. Para os distúrbios com transitórios curtos e rápidos, a detecção pôde ser realizada nos primeiros níveis de detalhe (1 ou 2), onde a *wavelet* apresentou uma melhor localização no tempo. Para estes casos, todas as três *wavelets* estudadas detectaram corretamente o início do ocorrido. Porém, como o fim do distúrbio apresenta uma transição menos severa que o início, somente as *wavelets* db4 e db12 conseguiram detectar esta situação corretamente. Para os casos de impulsos, as *wavelets* apresentaram desempenho satisfatório, entretanto, a *wavelet* db4 foi a única a detectar os distúrbios com menores freqüências. Assim, a db4 foi considerada mais adequada para detectar tanto os distúrbios de alta freqüência como os de baixa freqüência dispondo de até o 4º nível de decomposição.

Poisson, *et al*. [13] descrevem uma comparação entre ferramentas de processamento de sinais que utilizam a representação tempo-freqüência para a análise da QEE. A comparação é realizada entre a TF, a Transformada *Wavelet* Contínua (TWC), AMR e Transformada Quadrática (TQ). A TWC é baseada em uma função *wavelet* complexa similar à função base *Morlet* e implementada usando algoritmos recursivos. A AMR usa a *wavelet Feauveau* como *wavelet* mãe. Quatro tipos de distúrbios são usados para a comparação das ferramentas neste estudo. São eles: afundamentos de tensão, transitórios oscilatórios, distorções harmônicas e *flicker*. Todos os distúrbios foram analisados por cada uma destas ferramentas citadas. No trabalho, realiza-se então, uma comparação dos resultados, apresentando as vantagens e desvantagens de cada técnica de processamento de sinal aplicada aos distúrbios analisados. Conforme apresentado pelos autores, a AMR e TQ são ferramentas confiáveis para detectar mudanças no sinal e identificar o conteúdo de freqüência existente no sinal. A TWC é uma ferramenta confiável para detectar e medir afundamentos, transitórios e *flicker*. Mas nenhuma

destas técnicas é eficaz para detectar e medir a magnitude dos conteúdos harmônicos, como a TF.

Uma nova técnica de classificação para os problemas associados à QEE é proposta por Dash *et al.* [14]. Eles dispõem de um sistema composto por uma Combinação Linear de *Fourier* (CLF) e um Sistema *Fuzzy* (SF). A CLF é apresentada em forma de uma rede *Adaline*, que tem uma seqüência de entrada e uma resposta desejada – seqüência de sinal e parâmetros de peso. Os dados de tensão e/ou correntes são pré-processados pela CLF, onde são estimadas a fase, a amplitude e a Distorção Harmônica Total (DHT) da forma de onda. Após este pré-processamento, ativa-se o módulo de classificação, composto pelo SF. Este último se baseia na mudança do valor de pico da amplitude e na DHT da onda calculada no pré-processamento como variáveis de entrada. Na saída é incorporada uma incerteza $\lambda$ para compensar a discrepância entre o valor de saída final e o valor observado. A classificação do distúrbio é o valor obtido pela saída do SF.

Em [15] os autores apresentam a caracterização dos eventos da QEE utilizando a TF e a TW. A TF é utilizada para caracterizar os fenômenos que ocorrem em regime permanente, e a TW é utilizada para caracterizar os fenômenos transitórios. Os mesmos analisaram os fenômenos ocorridos durante os seguintes eventos: quando da energização de transformadores, operações de manobra e energização de banco de capacitores. Com as características extraídas pela TW e TF dos diversos distúrbios, foi construído o módulo de classificação que dispõe de um sistema especialista em regras. Estas características foram incorporadas na base de conhecimento deste sistema de classificação.

Elmitwally *et al*. [16] apresentam um sistema para detecção e diagnóstico de eventos de QEE dispondo de uma combinação da TWD e de um Sistema *neurofuzzy.* Para os eventos que variam lentamente no tempo, os mesmos calcularam a energia do sinal empregando o valor RMS. Já para os que variam rapidamente no tempo, é obtido um molde da freqüência

fundamental, utilizando-se da TRF. O sinal original é subtraído deste molde, deixando somente o sinal com distúrbio. Posteriormente é realizada a extração do ruído deste sinal aplicando a TWD com filtro db8 e AMR em escala 8. A reconstrução do sinal é quase livre de ruídos e possui a mesma energia do sinal original. O sinal livre de ruídos é decomposto em cinco níveis, utilizando a AMR com filtro db2. Após está decomposição, cria-se o vetor característico que servirá de entrada do sistema *neurofuzzy* para efetuar a classificação. A arquitetura de classificação empregada possui 4 entradas e 10 saídas (dez redes). Cada uma das dez redes é dedicada a reconhecer uma categoria de evento. Esta arquitetura apresenta uma redução no número de regras devido à técnica *Clustering Subtractive Fuzzy* utilizada para o treinamento. Conforme o relato, com esta técnica o número de regras passou de 180 para 88.

Kezunovic [17] apresenta um *software* para a análise do afundamento de tensão, suas causas e seus impactos. Inicialmente, aplicou-se a TW juntamente com a TRF para a extração das características dos distúrbios. Estas características serviram de entrada para o SF detectar e classificar os distúrbios. Este sistema possui oito sub-módulos, sendo que cada sub-módulo representa um tipo diferente de distúrbio. Após a classificação é realizada a caracterização dos afundamentos de tensão. Para isto, é empregado a TW para melhor localizar no tempo estes parâmetros e a TRF para obter a magnitude dos mesmos. Em seguida, se a queda de tensão for identificada como um afundamento causado por uma falta, o *software* encontra a posição onde ocorreu a falta, utilizando Algoritmos Genéticos (AG). Finalmente, a lógica implementada permite a reconstrução da forma de onda do afundamento com a finalidade de testar os impactos deste afundamento na operação do equipamento.

Em outro trabalho, Kezunovic e Liao [18] apresentaram uma continuação dos estudos já reportados. Foram utilizados nas simulações 10 ciclos de amostras de tensão das três fases. Os autores utilizaram-se da db4 e dos coeficientes de detalhe do segundo nível para o cálculo das características. Como entrada do SF, eles utilizaram oito diferentes características ineren-

tes aos distintos tipos de distúrbios. Foram simulados 350 eventos utilizando equações algébricas e o programa EMPT. O SF apresentou uma porcentagem de acerto na classificação, segundo os autores, de 99%.

Chen Xiangxun [19] sugere uma nova metodologia dispondo da TW para detectar, quantificar e classificar VTCDs relacionadas à QEE. O autor extrai características exclusivas dos distúrbios a partir de informações no domínio do tempo e/ou da freqüência, realizando, posteriormente, uma conversão binária para decimal. O autor construiu uma *wavelet* mãe biortogonal baseada no teorema de *Vetterli-Herley-Sweldens*, depois de comprovar que estas *wavelet*s biortogonais são melhores que as *wavelets* tradicionais e as complexas. Esta afirmação é devido às *wavelets* mãe da família *Daubechies* e várias *wavelets* biortonormais de *Daubechies-Cohen-Feauveau*, não serem adequadas para detectar e classificar afundamentos e elevações na ocorrência de distorção harmônica. Para a classificação, utilizou-se de um vetor característico com cinco elementos representado por um código binário, que foi posteriormente convertido para decimal.

Em [20] é apresentado um classificador *neurofuzzy* para reconhecimento de distúrbios de QEE. O classificador *neurofuzzy* utiliza a arquitetura LVQ (*Learning Vector Quantization*) para reconhecimento de padrões e a flexibilidade da Memória Associativa *Fuzzy* (MAF) para tratar as incertezas. Nesta apresentação, os dados são pré-processados pela TW, adotando-se a decomposição até o quinto nível pelo emprego da db4. Conforme colocado, este sistema é capaz de reconhecer 13 tipos de distúrbios, sendo que a TW é aplicada para processar e isolar as características dos mesmos. Os coeficientes do primeiro nível de detalhe (CD1) são utilizados para classificar quatros distúrbios do Grupo A (chaveamento de capacitor de alta e baixa freqüência, transientes impulsivos e *notching*). Caso a entrada não pertencer ao grupo A, os coeficientes do 5º nível de aproximação (CA5) devem ser verificados para o reconhecimento dos padrões do Grupo B (desvio da freqüência fundamental, afundamento, elevação, interrup-

ção, componente DC, flutuação de tensão e harmônicas contendo componentes de baixa ordem - até quarta ordem). Não pertencendo a estes dois grupos, a forma de onda de entrada pertencerá a um dos dois elementos do Grupo C (Harmônicas de média e/ou alta freqüência e forma de onda normal). Para separar esses dois padrões, considerou-se a média dos coeficientes dos detalhes CD2~CD5. É utilizado o valor RMS como critério para a classificação do Grupo C. Para todo o conjunto de treinamento, a taxa de reconhecimento é maior que 93% e, o conjunto de treinamento específico para cada tipo de distúrbio, foi maior que 90%.

Uma comparação entre três formas de caracterização da magnitude de distúrbios de QEE é apresentada por Wang *et. al.* em [21] e [22]. O cálculo do valor RMS da tensão, o valor de pico da tensão e da componente da tensão fundamental são introduzidos para quantificar o nível de severidade observado. Para obtenção destes valores, foi utilizado a TRF e TW. O valor RMS foi obtido utilizando-se dos coeficientes de detalhe da TW. A componente da tensão fundamental foi obtida através da aplicação da TRF. O valor de pico da tensão foi obtido pela comparação do máximo valor absoluto da janela estudada com o maior valor da janela precedente. Para verificar e validar o estudo, os autores utilizaram um afundamento de tensão em um sistema elétrico radial. O afundamento foi simulado em 60 Hz, com freqüência de amostragem de 15.360 Hz, o que corresponde a 256 amostras por ciclo. Como apresentado, fica claro que a componente da tensão fundamental é qualificada para distúrbios de QEE que apresentem uma grande variação da magnitude, como afundamentos, elevações e interrupções. Ao contrário, o cálculo do valor RMS da tensão é apropriado para situações onde harmônicas e/ou *flickers* são predominantes. O valor de pico da tensão pode ser utilizado como uma caracterização assistente para a classificação dos transitórios. Os pesquisadores afirmam que a componente fundamental da tensão é a variável apropriada para a caracterização da magnitude da maioria das situações estudadas.

Shah Baki *et al.* [23] propõem um método de classificação de distúrbios transientes utilizando a TW e SF. A forma de onda do distúrbio é processada usando a TW, utilizando-se do 1º nível de decomposição do sinal. Empregam-se para a detecção os coeficientes de detalhe e para a classificação, calcula-se a amplitude e a duração do transiente. Estes dois últimos valores são as entradas do SF. Para a primeira entrada, "tempo de duração", foram utilizadas oito funções de pertinência. Já para a segunda entrada, "amplitude do sinal", sete funções de pertinência foram consideradas. A saída deste SF é a classificação do distúrbio dentre transitório oscilatório e transitório impulsivo. Para testar o sistema, foram utilizados dados reais, registrados em uma das subestações da *University Technology MARA (UITM)* na Malásia. A eficiência deste método, segundo os autores, é de aproximadamente 94,5% de acertos para todas as situações avaliadas.

Uma técnica para detectar as causas de afundamentos de tensão utilizando TW e SF é proposta por Mukerjee *et al*. em [24] e [25]. Utiliza-se da TW para extração das características. O método emprega como características um fator Positivo-Negativo (PN), a tensão característica e a tensão de seqüência zero. É proposto um Índice denominado Salto de Freqüência (ISF), sendo este computado para identificar as faltas envolvendo a terra, com ou sem impedância caracterizada. Amostras instantâneas das fases A, B e C (Va, Vb, Vc, Vab, Vac e Vcb) são utilizadas para a extração das características. A condição de detecção do afundamento compreende três níveis de avaliação, sendo que cada nível possui um conjunto *fuzzy* com suas próprias regras. O primeiro nível checa as tensões de fase em função dos valores RMS. Se um ou mais valores estiverem abaixo de 1 p.u. (por unidade), o fator PN é examinado. O fator PN é caracterizado pelo maior valor das seis tensões, indicando o desbalanceamento da falta. O segundo nível avalia se a falta envolve o condutor terra, através da verificação da tensão de seqüência zero. A tensão característica é verificada para identificar a fase, ou fases envolvidas, caso o desequilíbrio seja identificado devido a uma falta no segmento da rede monitora-

da. O terceiro nível indica o índice de salto da freqüência, junto com a tensão de seqüência zero, para confirmar o tipo especifico da falta. Na desfuzificação, os conjuntos de saída são definidos como: afundamentos leve (0,1 – 0,15 p.u.), médio (0,15 – 0,22 p.u.) e alto (0,22 – 0,25 p.u.). Cabe colocar que esta técnica sugerida de diagnóstico emprega os índices propostos pelo IEEE PI564 [26].

Em [27], Tiwara *et al*. apresentam uma metodologia para detecção, localização e classificação de fenômenos ligados a QEE. Para isto, os mesmos utilizaram um esquema híbrido composto pela TWD e SF. A TWD realiza a detecção e localização dos fenômenos, gerando assim após esta etapa, a curva de extração característica. Esta curva servirá de entrada do SF que irá realizar a classificação do fenômeno observado. Este sistema contempla os seguintes fenômenos no que diz respeito a sua classificação: elevação, interrupção e afundamento de tensão, harmônicas de elevadas ordens e sub-harmônicas. Fora estes casos, o sistema também classifica a condição normal de operação do sistema. Diante dos resultados apresentados, a abordagem híbrida veio a responder satisfatoriamente ao desejado.

Zhu *et al.* [28] propõem um sistema de reconhecimento e identificação para seis tipos de distúrbios relacionados à QEE utilizando a TW e SF. A energia da TW em cada nível é utilizada para extrair as características do distúrbio. Baseadas nestas características são criadas as regras utilizadas no SF. O SF tem por função, efetuar a classificação dos diferentes distúrbios, dentre os quais se têm: alta e baixa freqüência devido ao chaveamento de banco de capacitores, afundamento de tensão, transitório impulsivo, energização de transformador e a forma de onda perfeitamente senoidal. A fim de ilustrar a eficácia do algoritmo proposto, foram feitas simulações baseadas no sistema de distribuição de energia de uma refinaria. Um banco de dados com 507 distúrbios foi formatado para habilitar o SF e realizar um ajuste fino no mesmo. Após a realização desta etapa, outros 1106 casos foram gerados para testar o classificador *fuzzy*. Tais sinais gerados foram caracterizados por 512 amostras. Embora pudessem

ser decomposto até o 9º nível, estes foram até o 5º nível, pois as freqüências mais baixas não refletiam os distúrbios de interesse associados à QEE. Os pesquisadores obtiveram uma resposta do algoritmo, quanto à classificação, bastante satisfatória. Foi simulada também a inserção de ruídos no sinal para verificar a robustez do classificador. Verificou-se que o algoritmo proposto é robusto desde que a amplitude máxima do ruído não ultrapasse o valor máximo de 9% do valor de pico da forma de onda senoidal.

Em [29] trata-se do uso da TW e de SF para detecção e classificação automática de distúrbios de QEE. Para a extração das características do sinal é utilizado a TW e a TF. Os mesmos empregaram 10 ciclos do sinal de tensão trifásica amostrado, com os seus valores em p.u. De acordo com as características observadas são definidas as regras do SF. A saída deste sistema é a classe do distúrbio, sendo as mesmas: *flicker*, impulso, interrupção, elevação e afundamento de tensão, *notching*, transitório e harmônico. Para a validação do algoritmo, um estudo de caso foi realizado. Foram geradas dispondo do EMTP, 800 formas de ondas, 100 para cada distúrbio. Foi obtida uma eficiência de 99% de acerto no que diz respeito à classificação dos fenômenos. Para uma análise comparativa, os autores empregaram uma RNA para a classificação. A entrada utilizada para a RNA foi a mesma utilizada no SF. A RNA obteve uma correta identificação de 97% das situações apresentadas, demonstrando a eficiência do sistema proposto.

Latha Mercy *et al*. [30] propuseram uma técnica que utiliza a TW *spline* e SF para detectar, localizar e classificar os eventos de QEE. Esta técnica consiste de duas etapas. Na primeira, a TW *spline* é empregada para gerar um conjunto de vetor característico ótimo, e no segundo estágio, o SF é utilizado para a classificação dos eventos. Os componentes de freqüência do distúrbio são extraídos exatamente usando a TW *spline*. Os vários distúrbios considerados para a análise são: afundamento, elevação e interrupção de tensão, chaveamento transitório, transitório de tensão e *spikes* de tensão. Foram utilizadas oito características como

entrada para o SF. No total, são empregadas 10 regras e as funções de pertinência usadas são do tipo trapezoidal. Uma vez que o SF fornece a classe do distúrbio, a etapa seguinte é obter o tempo e a duração exata da ocorrência. O instante da ocorrência e a duração dos eventos são calculados também usando a TW *spline*. O SF obteve uma taxa da exatidão próxima de 98% para todos os casos avaliados.

Siu *et al.* [31] apresentam um procedimento integrado que utiliza a TW juntamente com a TF para extração das características do sinal e de uma arquitetura de RNA para a classificação do distúrbio. Inicialmente o sinal de entrada é decomposto em aproximações e detalhes utilizando a TWD. Nos coeficientes de aproximação do primeiro nível é aplicada a TRF para se obter o espectro de freqüência do sinal distorcido. Os ruídos são extraídos dos coeficientes do primeiro nível de detalhe, e são utilizados para se analisar a mudança no valor RMS da componente fundamental, duração do distúrbio e mudança da componente DC. Após obter as características do sinal, realiza-se a classificação do mesmo. Para isso, são utilizados dois classificadores. O primeiro classificador, baseado em regras, vem a classificar os seguintes distúrbios: transitório impulsivo, transitório oscilatório, afundamento, elevação e interrupção de tensão. Já o segundo, utilizando uma arquitetura neural, além dos distúrbios citados, classifica também harmônicas, DC *offset* e variação da freqüência. Ambos os classificadores apresentaram respostas satisfatórias.

Neste artigo [32] os autores apresentaram uma técnica baseada na LF para caracterizar os distúrbios de QEE e simular os impactos destes mesmos eventos sobre sensíveis equipamentos. Os mesmos utilizaram a TW e a TF para extrair características intrínsecas do sinal perturbado, alimentando então o SF. Para esta técnica, foi usado o *Toolbox* do *Matlab* que contempla *Fourier*, TW e SF. O algoritmo foi testado com dados registrados em vários pontos de *Brisbane,* Austrália. Para medição dos dados, foi utilizado um medidor de qualidade referenciado como *BMI 8010 PQnode* [33]. O impacto nas cargas sensíveis foi simulado através

do programa *Simulink* [34]. O comportamento de um motor de indução de freqüência variável na presença de um afundamento foi simulado para investigação inicial dos impactos deste fenômeno no equipamento. Conforme ressaltado pelos autores, este estudo é interessante para prever o desempenho das cargas e também para explicar porque certas cargas falham na presença de certos distúrbios de QEE.

Wang *et al.* [35] utilizaram da Transformada *Wavelet Packet* (TWP) para decompor os sinais contendo distúrbios relacionados à QEE. Pelos autores, dispõem-se da energia e da entropia calculada nos nós terminais (folhas da árvore) para formar o vetor característico. Para a classificação do sinal, estes utilizaram um classificador linear *piecewise*. Os fenômenos classificados estão entre afundamento, elevação e interrupção de tensão, sinal em regime permanente e transitório impulsivo. Vale comentar que os fenômenos foram simulados dispondo do *software* ATP. Para cada tipo de distúrbio foram simulados 20 sinais como amostras de teste. Utilizaram-se da db2 para a decomposição do sinal. O mesmo foi decomposto em três níveis, sendo a energia e a entropia dos nós terminais do terceiro nível selecionadas para formar o vetor característico. Dos 100 casos testados, 82 foram corretamente reconhecidos quando utilizado a energia como vetor característico. Para os mesmos casos, 94 foram corretamente associados quando utilizado a entropia como vetor característico.

Em [36] é apresentado um *hardware* que visa analisar automaticamente distúrbios de QEE. A aplicação foca na utilização da TW para a extração das características. Para a classificação é utilizada uma combinação de RNA e LF. O sistema foi modelado utilizando VHDL (VHSIC *Hardware Description Language*), e posteriormente o projeto foi sintetizado para *APEX EP20K200EBC652-1X FPGA* [37], testado e validado. Os sinais distorcidos são amostrados e pré-processados por uma TWD de 5º nível para extração da característica. O sinal é amostrado com 256 amostras por ciclo. A saída do pré-processamento é um vetor característico que é a entrada para o estágio de processamento. O estágio de processamento é realizado

por um bloco de uma RNA treinada para reconhecer padrões de pares de entrada e saída, do banco de dados dos distúrbios. A saída do bloco da TWD é a entrada da RNA. O bloco RNA processa os coeficientes e envia os resultados da avaliação para o bloco do SF para classificar o tipo de distúrbio. O SF verifica qual a percentagem dos dados que pertence a certa classe particular de distúrbio. Assim a saída do SF é a classe do distúrbio. Os autores obtiveram uma resposta superior a 97% de acerto.

Em [38] é explorado as diversas características que podem ser usadas como base para a identificação de distúrbios de QEE. Os distúrbios podem ser classificados de acordo com os seguintes fatores: características típicas, que são a amplitude e duração do distúrbio, das possíveis causas ou fontes de perturbação, e pelo efeito que causa nos dispositivos sensíveis. A escolha destes fatores depende da intenção da classificação. Assim, para projetar um classificador, observam-se inicialmente quais são as características que serão utilizadas para diferenciar uma perturbação da outra, já que essa escolha influenciará diretamente no processamento e na tomada de decisões. Utiliza-se a TW para identificar as descontinuidades do sinal, determinando assim o início e o término do distúrbio, e decompor o sinal em vários níveis. A variação da energia de cada banda é aplicada como característica para a classificação. Os autores testaram o valor RMS com janelas de meio e um ciclo para determinar o início e o término do distúrbio, observando certo atraso inerente ao processo. Verificou-se que a variação do tamanho da janela apresenta resultados diferentes podendo até levar a uma decisão diferenciada.

Zhu e Chen [39] propõem uma técnica alternativa para caracterizar variações de tensão de todas as durações. Os autores sempre deram uma ênfase maior nos distúrbios de pequena duração, que são difíceis de identificar quando da utilização do valor RMS. Os mesmos utilizaram a TW para determinar o início e o fim do distúrbio, e o valor RMS para determinar a amplitude da tensão remanescente. Para exemplificar, foi empregado um sinal amostrado a 12.8kHz, com 256 amostras por ciclo, sendo a freqüência do sistema de 50Hz. Com a *wavelet*

db2 o sinal foi decomposto até o quinto nível para garantir que se tenha amostra suficiente para o cálculo da energia. Para os distúrbios de interrupção, afundamento, elevação e pequenas interrupções de tensão, os autores realizaram uma comparação entre a TW e o valor RMS. Nos três primeiros casos, as duas ferramentas identificaram corretamente a amplitude, o início e o fim do distúrbio, porém a TW teve uma melhor precisão, com erro máximo de 0,625ms em relação à duração do distúrbio. Já para o valor RMS o erro foi em torno de 8,5ms. Para o caso de elevação, o valor RMS demorou mais para detectar o início. As pequenas interrupções, menor que meio ciclo, não foram identificadas pelo método do valor RMS. Para uma pequena interrupção de 7,8125ms, pela TW, a duração estimada é de 8,125ms e magnitude menor que 0,1p.u. Já pelo cálculo do valor RMS a magnitude obtida foi superior a 0,1p.u. e a duração estimada de 17,58ms.

Perez e Barros [40] realizaram um estudo comparativo entre os métodos mais comuns utilizados para a detecção e caracterização de perturbações de tensão em sistemas elétricos. Sendo os métodos: valor RMS, a TW, a Transformada de *Fourier* de Tempo Reduzido (STFT - *Short Time Fourier Transform*) e a filtragem de *Kalman*. Para comparar o desempenho das ferramentas, foi simulado um distúrbio com uma magnitude de 60% e duração de 21,25ms. Este afundamento é aplicado a uma tensão de 230 V, com freqüência fundamental de 50Hz. O afundamento foi caracterizado a dois ciclos da situação em regime permanente, e a freqüência de amostragem usada foi de 6,4kHz (128 amostras por ciclo). Para o valor RMS, a magnitude da tensão foi calculada de acordo com a IEC61000-4-30 [41]. A STFT é aplicada usando uma janela de um ciclo e os resultados são obtidos para cada nova amostra. Utiliza-se do filtro de *Kalman* estendido dispondo da componente fundamental e harmônica ímpares, da 3ª a 11ª ordem, para se ter uma representação precisa da tensão de suprimento durante o evento. A TWD é aplicada aos valores amostrais da tensão usando a *wavelet* mãe *Daubechies* com seis coeficientes. Os autores utilizam o primeiro nível de detalhe para determinar o início, o fim e

a duração do distúrbio e também para computar a magnitude em valor RMS da tensão de suprimento. Dos resultados obtidos, a TW foi a ferramenta que melhor se comportou para a detecção e análise do afundamento de tensão. Ressalta-se no trabalho que quando os sinais contêm ruídos e harmônicas, a TW precisa de uma ferramenta auxiliar para separar os eventos das perturbações de alta freqüência. Para os casos da STFT e do valor RMS, estes apresentaram uma demora para detectar o ponto inicial do distúrbio, e apresentam um desempenho limitado para eventos de pequena duração. O filtro de *Kalman* apresentou um bom desempenho na detecção e estimação da magnitude e da duração do evento. Os autores propõem uma combinação da TW para estimar os parâmetros relacionados com o tempo e o filtro de *Kalman* para obter a magnitude e o ângulo de fase.

Os autores propõem em [42] uma técnica para caracterizar eventos de QEE, dispondo da TWD, TRF e LF. Os mesmos implementaram a técnica com o auxilio do *Toolbox* do *Matlab.* Pela abordagem, identificam-se oito tipos de distúrbios, os quais são: elevação, afundamento e interrupção de tensão, impulso, transitório, *notching, flicker* e harmônica. Através da TWD e da TRF são calculados oito características inerentes aos diferentes tipos de eventos de qualidade. Estas características são utilizadas para formar as regras lingüísticas utilizadas pelo SF. O SF é composto por 9 regras, com 10 entradas e 8 saídas, sendo que cada saída representa uma classe de evento. A TWD e TRF são ferramentas úteis tanto para detectar simples distúrbios, como interrupção, ou fenômenos mais complexos, como impulsos. Uma das vantagens do SF é o fato da possibilidade de incluir novas classes de distúrbios, bastando para isso incluir novas regras.

Wang *et al* [43] apresentam um novo método para detecção e identificação de perturbações em QEE. Inicialmente o sinal é filtrado pela TW, sendo posteriormente decomposto até o nível onde se consiga separar a faixa de freqüência que se deseja filtrar. Determina-se então um limiar para selecionar os coeficientes que serão descartados, podendo assim o sinal

ser reconstruído livre de ruídos. Após esta etapa, o tempo de início e fim do distúrbio são determinados. Para isto, utiliza-se da diferença entre o sinal original e o sinal filtrado, conseguindo assim um sinal que contem somente os distúrbios. Para a classificação dos distúrbios foram utilizadas duas características do sinal: o período e o valor de pico do sinal com perturbação. Após a identificação do distúrbio, extraem-se mais algumas informações do sinal, como a amplitude da variação do sinal, a amplitude e freqüência da oscilação transitória, o tempo de subida e o valor de pico do transitório impulsivo. Os resultados das simulações apresentadas mostram que o método é rápido, sensível e prático para detectar e identificar distúrbios de qualidade.

Em [44], os autores propõem uma técnica para detectar variações de tensão utilizando duas *wavelets* mãe: a db1 e db10. Inicialmente, decompõem-se pela *wavelet* db1, até o sexto nível um sinal sem distúrbios para se obter o valor médio "M" dos módulos dos coeficientes de baixa freqüência. Após esta etapa, obtêm-se da mesma maneira, os módulos dos coeficientes do sinal testado. Com estes valores é feita a classificação do evento. Se o valor for menor que 0,1M, então o distúrbio é interrupção, caso esteja entre 0,1M a 0,9M, é considerado afundamento, e, permanecendo entre 1,1M e 1,8M, tem-se uma elevação. Por estes coeficientes também se determinam o ponto de início e fim do evento. No que segue, o sinal é decomposto com a *wavelet* db10 para obter os coeficientes de decomposição de alta freqüência. Isto é feito para detectar se existe um ponto de módulo máximo dentro de meio ciclo do sinal, entre os pontos de início e fim da ocorrência. Caso exista, o ponto encontrado com a db1 deve ser substituído por este. Os autores testaram o algoritmo com sinais que continham ruídos e os mesmos atestam que o algoritmo não é afetado por tal situação. Conforme relatado, o método também pode detectar vários tipos de variações de tensão em uma única janela detecção.

No capítulo que segue, comentários e apontamentos sobre as ferramentas a serem empregadas nesta pesquisa serão apresentados.

# 3. FERRAMENTAS UTILIZADAS

Este Capítulo apresentará uma descrição das ferramentas de processamento de sinal aplicadas no algoritmo proposto. Cabe adiantar que para a detecção será utilizada a TWD, dispondo da análise multiresolução. Já para a tarefa de classificar o evento manifestado, a TWD, a TRF e o valor RMS serão aplicados. Desta última função, procura-se dispor das técnicas mencionadas, usufruindo da melhor aplicação de cada aos fenômenos analisados.

## 3.1 O valor RMS

O valor RMS ou valor eficaz é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável. O nome deriva do fato de que estamos tomando a raiz (*root*) quadrada da média (*mean*) do valor ao quadrado (*square*) da função. Pode ser calculado para uma série de valores discretos ou para uma função variável contínua [48].

Para valores discretos, o valor RMS de um sinal de tensão é dado pela equação (2):

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} V_i^{\,2}} = \sqrt{\frac{V_1^{\,2} + V_2^{\,2} + \ldots + V_N^{\,2}}{N}} \tag{2}$$

Já para os valores contínuos, em um intervalo definido, $T_1 \leq t \leq T_2$, o valor RMS é ilustrado pela equação (3):

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [V(t)]^2 \, dt} \tag{3}$$

## 3.2 A Transformada de Fourier Janelada

A Transformada de *Fourier* (TF) é uma representação no domínio da freqüência de uma função no tempo. A análise de *Fourier* apresenta uma grande desvantagem, já que na transformação para o domínio da freqüência, informações do domínio do tempo são perdidas. Desta maneira, quando se observa uma transformada de *Fourier* de um sinal não é possível informar quando um evento particular aconteceu. Ou seja, caso ocorra algum evento em intervalos de tempo distintos, isso irá contribuir de maneira global para a transformada, afetando a representação como um todo [49].

Assim, para conseguir uma representação local, é utilizado um método que permite "*janelar*" o sinal em uma seqüência de intervalos, onde cada seqüência é suficientemente pequena de maneira que a forma de onda seja uma aproximação de uma forma de onda estacionária, ou, quase estacionária.

Este método é a Transformada de *Fourier* Janelada, uma adaptação da Transformada de *Fourier* proposta por Denis Gabor (1946 *apud* Misiti, 1997). Esta transformada consiste na multiplicação de um sinal de entrada *f*(t) por uma dada função janela *W*(t) cuja posição varia no tempo, isto é, dividindo o sinal em pequenos segmentos no tempo. Sendo assim, para cada janela é aplicada a TF. Desta forma, a cada janela temos um espectro de freqüência que apresenta o conteúdo da freqüência deste pequeno intervalo de tempo, mapeando o sinal em uma

função bidimensional de tempo e freqüência, como mostra a Figura 1. Com isso, pode-se representar a evolução do conteúdo de freqüência com o tempo, de todo sinal em análise [46] [49].

Vale comentar que a TFJ pode não ser adequada para análise de certos tipos de sinais, pois apresenta uma precisão limitada. Esta precisão é determinada pelo tamanho da janela, sendo que o tamanho da janela utilizada é o mesmo para todas as freqüências. Além disto, muitos sinais requerem uma aproximação mais flexível, onde se pode variar o tamanho da janela para determinar com precisão o tempo ou a freqüência [51].

**Figura 1 – Transformada de Fourier Janelada**

## 3.3 A Transformada Wavelet

A TW é uma ferramenta matemática para a análise de sinais. A análise dos dados com escalas variáveis no domínio do tempo e da freqüência é a idéia básica da TW. A TW pode trabalhar tanto com dados contínuos como com dados discretizados. Assim, podem-se distinguir duas versões diferentes da Transformada *Wavelet*, a contínua e a discreta:

- A Transformada *Wavelet* Contínua (TWC): mapeia uma função de uma variável contínua em uma função de duas variáveis contínuas.
- A Transformada *Wavelet* Discreta (TWD): decompõe um sinal discreto em diferentes escalas, com diferentes níveis de resolução.

### 3.3.1 A Transformada Wavelet Contínua

A TWC de uma determinada função ***f*** é representada pela equação (4) [51]:

$$TWC(f;a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\sum f(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{4}$$

Analisando esta equação verifica-se que a TWC depende de dois parâmetros, ***a*** e ***b*,** que variam continuamente em $\Re$ e estão relacionados com o fator de escala e translação, respectivamente. As funções $\psi_{a,b}$ são denominadas *Wavelet* mães. Assim a função *f*(t) unidimensional pode ser representada por uma nova função bidimensional.

A *wavelet* mãe pode ser associada à função janelada. O fator de escala ***a*** e o tamanho da janela são interdependentes, onde maiores escalas implicam em maiores janelas. Deste modo, com este fator podem-se analisar as componentes de alta freqüência, com um fator de escala pequeno e, conseqüentemente, as componentes de baixa freqüência, podem ser analisadas com um alto fator de escala, permitindo assim obter informações mais detalhadas do sinal.

#### *3.3.1.1 Fator de translação*

O fator de translação é utilizado para deslocar a *wavelet,* ou seja, adiantá-la ou atrasá-la em relação ao eixo das abscissas. Matematicamente seria como acrescentar ou subtrair um fator *k* em uma função. Este fator de translação é ilustrado na Figura 2.

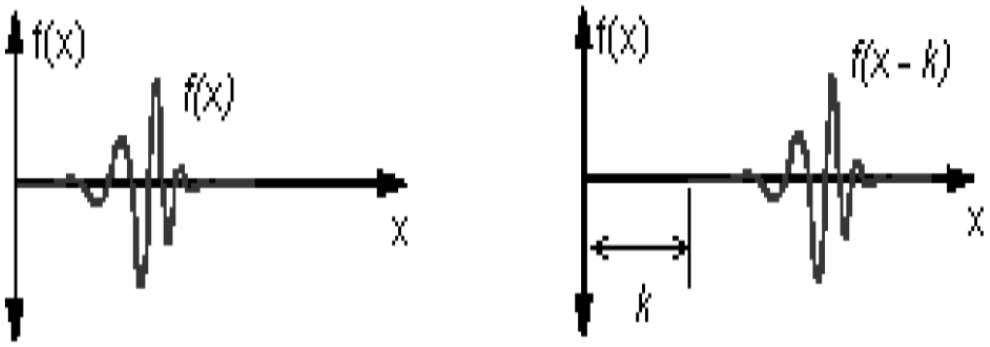


**Figura 2 – Translação aplicada à *wavelet***

### *3.3.1.2 Fator de Escala*

O fator de escala implica na contração ou dilatação do sinal. Observando a figura 3, podemos ver a aplicação do fator de escala em um sinal senoidal. Quanto menor o fator escala, mais "contraído" será a sinal. Da mesma forma, este fator trabalha com a *wavelet*, contraindo-a ou dilatando-a.

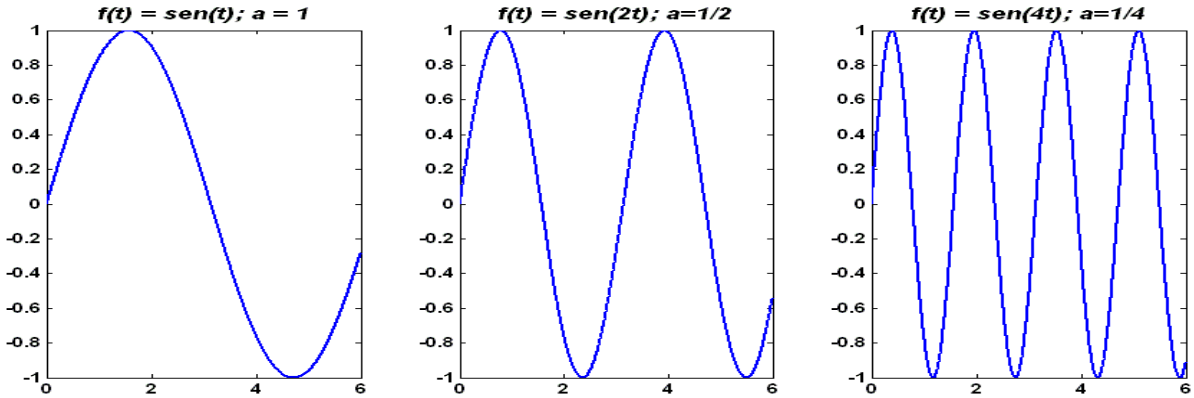


**Figura 3 – Aplicação do fator de escala em uma função seno.**

Para a análise *wavelet* o fator de escala está relacionado diretamente com a freqüência do sinal, ou seja:

- Fator de escala alto → *wavelet* dilatada → detalhes que variam lentamente → sinal com baixa freqüência.
- Fator de escala pequeno → *wavelet* comprimida → detalhes que variam rapidamente → sinal com alta freqüência.

Na Figura 4 é apresentada a aplicação do fator escala à *wavelet* db3.

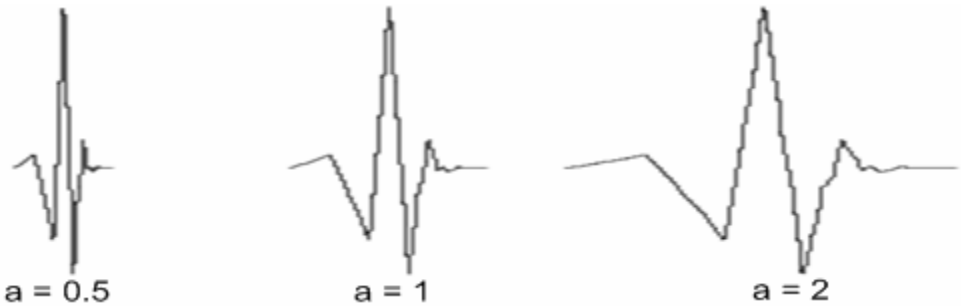


**Figura 4 – Aplicação do fator escala à *wavelet* mãe db3**

### 3.3.2 A Transformada Wavelet Discreta

A TWC normalmente é utilizada para a extração das características das transformadas. Devido à discretização dos dados, a TWD apresenta um melhor desempenho do ponto de vista de implementação computacional. Do ponto de vista matemático, a TWD permite decompor, em diversas escalas, uma função discreta (sinal discreto) como uma combinação linear de funções ortogonais de duração finita, chamadas função escala (*scaling),* $\phi$, e função *wavelet* $\psi$, funções estas que podem ser transladadas e dilatadas convenientemente [52]. Temos a representação desta combinação linear na equação (5) [53]:

$$f[n] = \sum_{k=0}^{\frac{n}{2^j}-1} R_{j,k}[n]\phi_{j,k}[n] + \sum_{t=1}^{j}\sum_{k=0}^{\frac{n}{2^j}-1} S_{t,k}[n]\psi_{t,k}[n], \tag{5}$$

Sendo,

$$\phi[n] = \sum_k h[k]\phi(2n-k) \tag{6}$$

$$\psi[n] = \sum_k g[k]\phi(2n-k) \tag{7}$$

onde *j* é o nível de decomposição, *n* é o *n-ésimo* componente do sinal *f[]*, *k* é o *k-ésimo* elemento dos filtros, *h[k]* (filtro passa-baixa) e *g[k]* (filtro passa-alta) que formam um par de QMF (*Quadrature Mirror Filter*) [54]. $R_{j,k}$ e $S_{j,k}$ são os produtos escalares da função ***f*** com as funções escala $\phi[n]$ e *wavelet* $\psi[n]$, respectivamente, conforme ilustrado a seguir:

$$\mathrm{R}_{\mathrm{j,k}}[n] = \langle f, \phi_{\mathrm{j,k}}[n] \rangle \tag{8}$$

$$\mathrm{S}_{\mathrm{j,k}}[n] = \langle f, \psi_{\mathrm{j,k}}[n] \rangle \tag{9}$$

As funções *wavelet* $\psi[n]$ e escala $\phi[n]$ formam uma base ortonormal, $\psi_{j,k}$. A equação (5) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$f[n] = \sum_{j,k} \langle \psi_{j,k}(n), f(n) \rangle \psi_{j,k}(n) \tag{10}$$

Cabe comentar que a discretização da TWD ocorre em função dos fatores de escala e de translação, já que os parâmetros ***a*** e ***b*** variam discretamente em $\Re$. A TWD pode ser representada de uma maneira geral pela equação (11) [52].

$$(TWD)(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0}^{\,m}} \sum_n f(n) \psi\left( \frac{t - nb_0 a_0^{\,m}}{a_0^{\,m}} \right) \tag{11}$$

Onde $\psi$ é a *wavelet* mãe e os parâmetros ***a*** e ***b***, tornam-se funções dos parâmetros inteiros ***m*** e ***n***, ou seja, $a = a_0^m$ e $b = nb_0a_0^m$. Devido a essa discretização, o espaço tempo-freqüência passa a ser representado por intervalos discretos.

Do ponto de vista dos cientistas, engenheiros, físicos e outros profissionais aplicados, a TWD é um processo de filtragem digital no domínio do tempo (via convolução discreta), usando filtros de análise (h[] passa baixa e g[] passa alta) seguida de *downsampling* de 2 [54]. Este processo será apresentado a seguir.

### 3.3.3 A Análise Multiresolução

A técnica de análise multiresolução (AMR) decompõe um dado sinal em diferentes níveis de resolução, de modo a fornecer informações tanto no domínio do tempo como no domínio da freqüência. O sinal discreto inicialmente é decomposto em dois outros sinais discretos distintos: d[] (detalhe) que é composto pelas informações de alta freqüência e a[] (aproximação) com as informações de baixa freqüência. Para exemplificar o processo de decomposição em seu nível mais básico, temos a Figura 5.

O sinal S discreto passa pelos filtros passa-baixa e passa-alta que devolvem dois sinais de saída. Como dito anteriormente, um sinal com as informações de baixa freqüência e outro sinal com informações de alta freqüência.

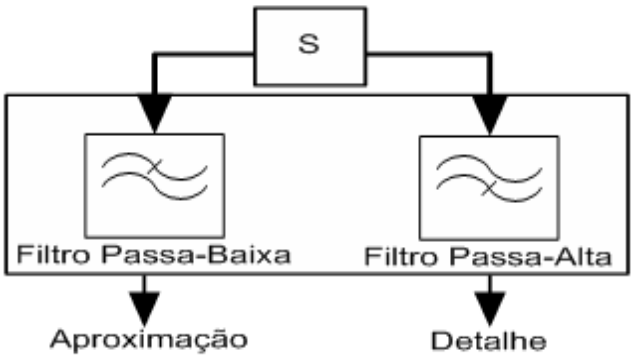


**Figura 5 – Processo de decomposição de um sinal através de filtragem**

Porém, estes dois sinais possuem a mesma quantidade de dados que o sinal original, obtendo-se assim o dobro de dados que o sinal original. Para ilustrar esta situação temos um sinal original com 2000 amostras de dados. Como pode ser visto pela Figura 6a, as versões aproximadas e detalhadas contem cada uma 2000 amostras de dados.

Para solucionar este problema, é introduzido um operador que irá reduzir o número de amostras, denominado, operador "*downsampling*" (Figura 6b). A redução do número de amostras é realizada intercalando as amostras. Ou seja, considera-se a primeira amostra e desconsidera-se a segunda e assim por diante [51].

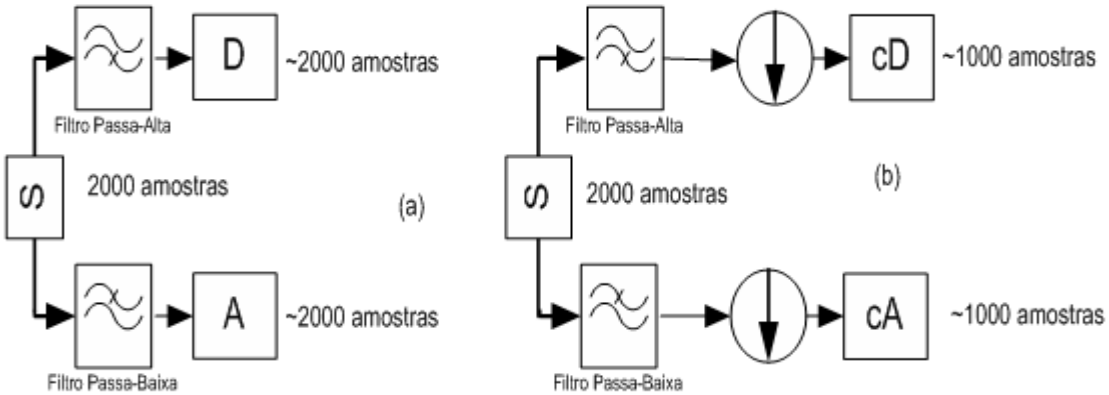


**Figura 6 – Decomposição do sinal: a) sem aplicação do downsampling e b) com o operador downsampling**

No processo da Figura 6b são gerados os coeficientes da aproximação (cA) e do detalhe (cD), referente a TWD.

Para exemplificar, um sinal elétrico com ruídos de alta freqüência é utilizado, aplicando-se a AMR (Figura 7).

De acordo com a Figura 7 os coeficientes de detalhe (cD) são compostos por altas freqüências, ou seja, a maior parte dos ruídos está contida nestes coeficientes, enquanto que os coeficientes de aproximação (cA) são compostos por baixas freqüências.

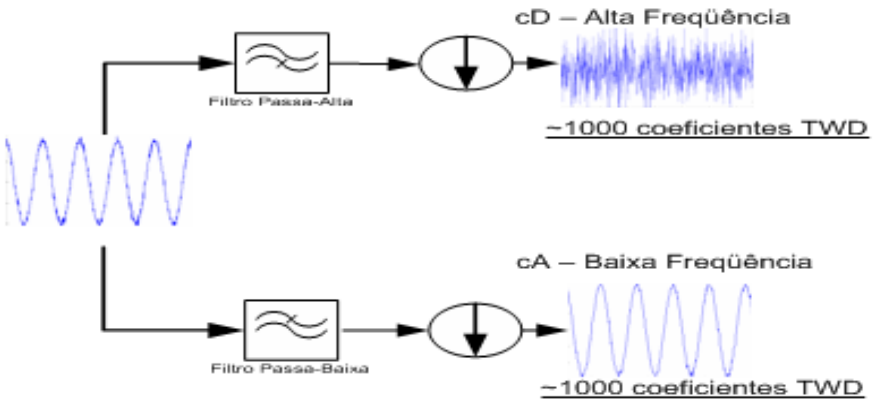


**Figura 7 – Filtragem considerando o operador *downsampling* de um sinal elétrico ruidoso.**

Conforme observado, o sinal formado pelos cA possui menos ruídos que o sinal inicial. Contudo, vale frisar que a decomposição do sinal original não apresenta uma única solução, dependendo dos filtros utilizados.

Nos casos até agora exemplificados, foi representada a decomposição do sinal em um único nível. Como dito anteriormente, a técnica da AMR decompõe o sinal em diferentes níveis. O processo de decomposição é iterativo, com decomposições sucessivas das aproximações [48]. A Figura 8 será utilizada para ilustrar esta decomposição.

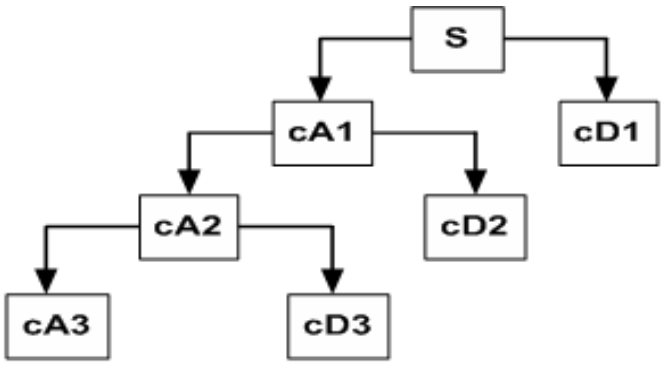


**Figura 8 – Sucessivas decomposições de um sinal elétrico**

Conforme a Figura 8, após a primeira decomposição do sinal, a próxima decomposição se realizará com a decomposição dos coeficientes de aproximação do primeiro nível. Estes coeficientes também serão decompostos em duas versões, e assim sucessivamente. Esta decomposição pode ocorrer até que se tenha somente um coeficiente, ou seja, uma amostra.

Para a Figura 9, utilizou-se o mesmo sinal da Figura 7 para a representação dos coeficientes *wavelets* decorrentes do processo de decomposição via AMR. Pode-se verificar que a cada nível de decomposição, as características do sinal vão alterando. Analisando o sinal pelo cA, temos que no primeiro nível cA1, o sinal ainda contem ruídos, mas em quantidade menor do que o sinal original S. Os ruídos em sua grande parte estão em cD1. Para a obtenção do segundo nível, é realizada a decomposição de cA1. Uma parte dos ruídos contidos em cA1, agora, estará em cD2. Logo, em cA2 o sinal apresentará menos ruídos, e assim por diante, para cada nível de decomposição à frente.

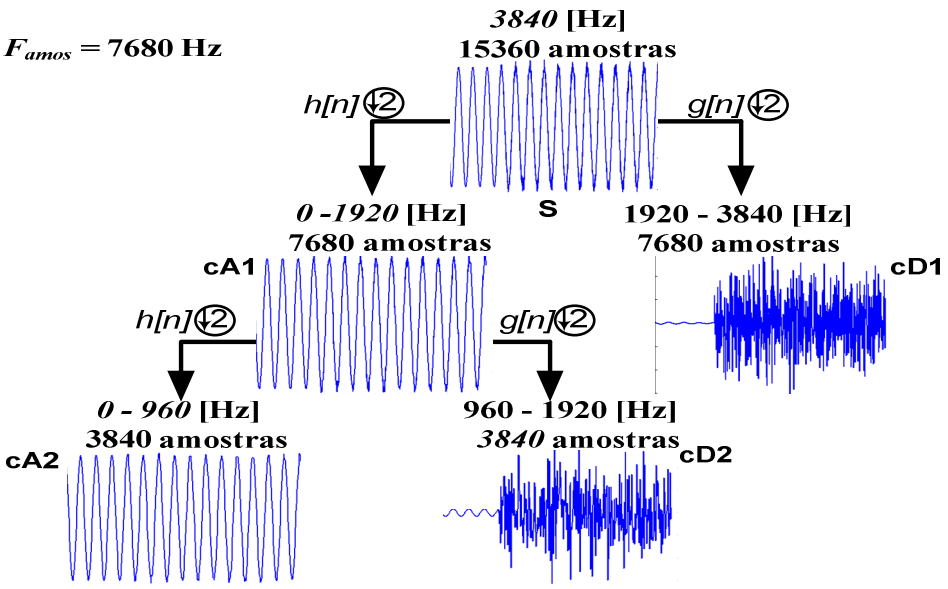


**Figura 9 – Exemplo de sucessivas decomposições sobre um sinal elétrico**

Pelo exposto, observa-se que o sinal transformado contém informações sobre as freqüências que compõe o sinal original e também onde tais freqüências se localizam dentro do

sinal. Como observado, cada nível de decomposição apresenta uma determinada faixa de freqüência.

Para a ilustração da Figura 9, o sinal empregado possui uma freqüência de amostragem de 7680 Hz. Segundo o Teorema de *Nyquist*, para garantir que a reprodução do sinal esteja livre do fenômeno *aliasing* (sobreposição de espectros), o sinal não deve conter componentes de freqüência superior que a metade da freqüência de amostragem. Logo podemos garantir somente a metade da freqüência de amostragem do sinal original, ou seja, 3840 Hz.

Sendo assim, de acordo com a Figura 9, temos a seguinte representação das faixas de freqüência para cada um dos níveis de decomposição:

- Aproximação 1 A1: [0 – 1920 Hz] - faixa de freqüência corresponde à metade inferior da freqüência do sinal original de entrada.
- Detalhe 1 D1: [1920–3840 Hz] - faixa de freqüência corresponde à metade superior da freqüência do sinal original de entrada;
- Aproximação 2 A2: [0 –960 Hz] - faixa de freqüência corresponde à metade inferior da freqüência do sinal obtido na aproximação anterior, A1;
- Detalhe 2 D2: [960 –1920 Hz] - faixa de freqüência corresponde à metade superior da freqüência do sinal obtido na aproximação anterior, A1.

Para os demais níveis a definição da faixa de freqüência é similar à obtida em A2 e D2, ou seja, a aproximação sempre será a metade inferior e o detalhe a parte superior da freqüência do sinal obtido na aproximação anterior.

A representação da região tempo-escala é apresentada pela Figura 10. De acordo com a Figura 10, podemos ver que existe uma divisão irregular do plano tempo-escala. Assim, quanto menor a escala, maior será a representação no tempo, e vice versa. A escala representa o nível de decomposição. Assim, quanto menor o nível de decomposição, melhor será a representação no tempo.

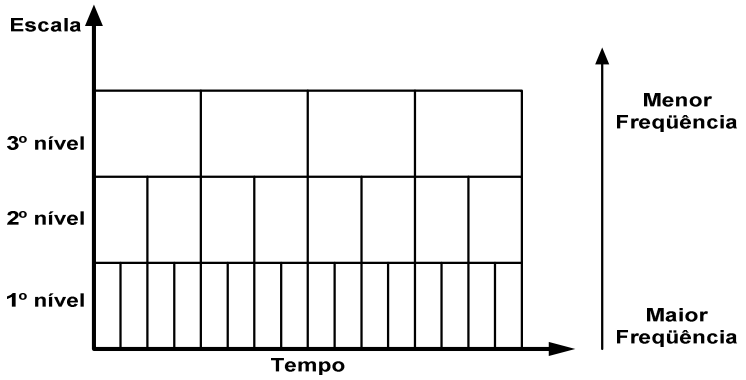


**Figura 10 – Representação da região tempo-escala.**

Como visto, a freqüência está inversamente relacionada com o nível de decomposição. Quanto menor o nível de decomposição maior a resolução no tempo e menor será a resolução na freqüência. Portanto, temos que esta divisão atribui pequenos intervalos no tempo para as componentes de alta-freqüência e intervalos maiores para as componentes de baixa freqüência. Esta divisão proporciona uma melhor representação do sinal nos domínios da freqüência e do tempo.

Para determinar a localização temporal de uma amostra em uma determinada faixa de freqüência, utiliza-se do plano tempo-freqüência. A Figura 11 ilustra uma decomposição de um sinal variável no tempo, composto por oito amostras e freqüência amostral de 7680 Hz. Este sinal é decomposto em 3 níveis.

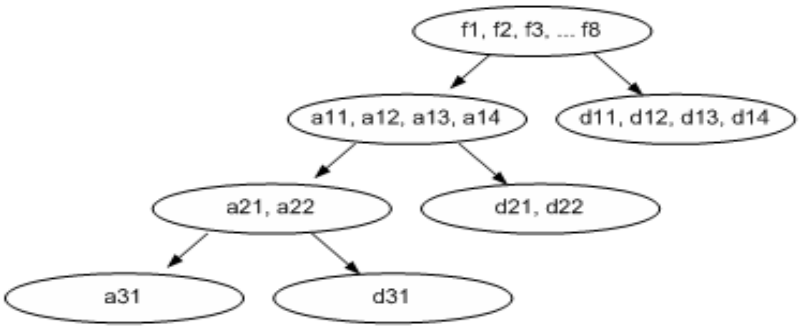


**Figura 11 – Decomposição de um sinal qualquer variável no tempo.**

A localização temporal e a faixa de freqüência de alguns coeficientes ilustrados na figura 11 são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Representação dos coeficientes no plano tempo-freqüência.**

| *Nível de decomposição* | *Amostra* | *Localização temporal entre* | *Localização na freqüência* |
|---|---|---|---|
| 1º | $a_{11}$ | $f_1$ e $f_2$ | $0-1920Hz$ |
| 1º | $d_{14}$ | $f_7$ e $f_8$ | $1920-3840Hz$ |
| 2º | $a_{21}$ | $f_1$ e $f_4$ | $0-960Hz$ |
| 2º | $d_{22}$ | $f_5$ e $f_8$ | $960-3840Hz$ |
| 3º | $a_{31}$ | $f_1$ e $f_8$ | $0-480Hz$ |
| 3º | $d_{31}$ | $f_1$ e $f_8$ | $480-960Hz$ |

De acordo com esta tabela, tem-se que as amostras situadas no primeiro nível de decomposição apresentam uma melhor representação no tempo. Visto que neste nível, uma amostra está situada entre duas amostras no tempo. Já no segundo nível, as amostras estão situadas entre quatro amostras no tempo, o que resulta uma menor resolução no tempo. Para a amostra do terceiro nível não se tem uma localização temporal definida, pois esta amostra pode estar em qualquer ponto entre $f_1$ e $f_8$. Já com relação à freqüência, tem-se o inverso.

Para o primeiro nível de decomposição, as amostras estarão em uma faixa de freqüência grande, que irá diminuir à medida que aumenta o nível de decomposição.

Para melhor exemplificar, tem-se na Figura 12 a representação de como se comporta a *wavelet* mãe para cada nível de decomposição.

Como pode ser observado, a *wavelet* mãe no primeiro nível de decomposição é mais comprimida. Com isto, tem-se uma melhor representação de sinais que variam rapidamente, ou seja, sinais com alta freqüência. Com o aumento do nível de decomposição, a *wavelet* se torna mais dilatada, permitindo assim uma representação dos sinais que variam lentamente no tempo.

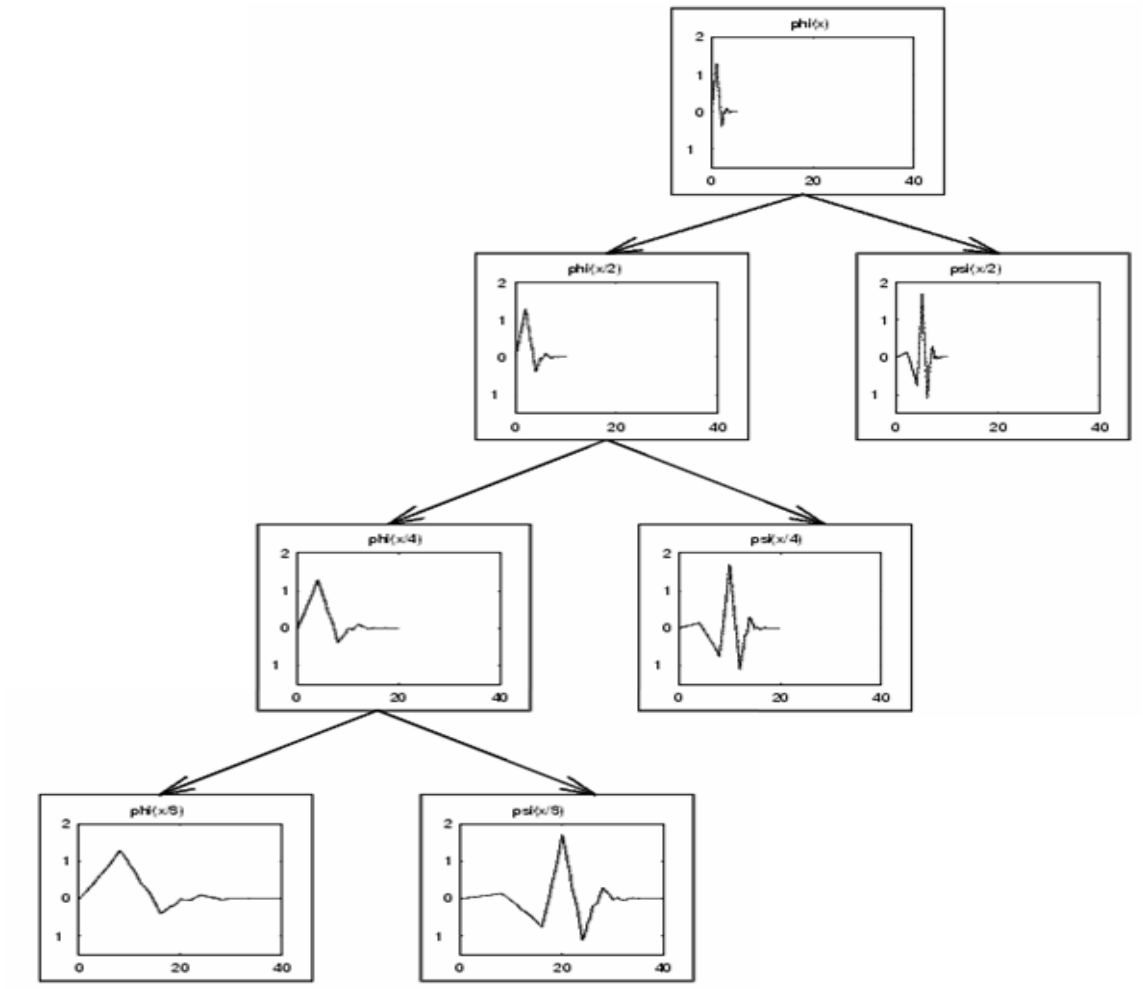


**Figura 12 – Comportamento da *wavelet* mãe na decomposição do sinal.**

### 3.3.4 Energia do sinal

A energia do sinal é calculada a partir da soma dos quadrados dos coeficientes do sinal de entrada. Tais coeficientes são particularmente caracterizados por cada nível de decomposição, sejam os mesmos resultantes da aproximação e/ou do detalhe. A TWD apresenta uma propriedade que é a conservação de energia. Assim, a energia do sinal transformado é igual à energia do sinal original. Esta conservação da energia é definida pelo teorema de *Parseval* .

O Teorema de *Parseval* relaciona a energia do sinal *f*(t) com a energia contida nos diferentes níveis de decomposição. Os seja, a energia pode ser repartida em termos dos coeficientes *wavelet* de expansão, da forma [45]:

$$\sum_{n=1}^{N} \left| f[n] \right|^2 = \sum_{n=1}^{N} \left| a_j[n] \right|^2 + \sum_{j=1}^{J} \sum_{n=1}^{N} \left| d_j[n] \right|^2 \tag{11}$$

Onde:

*f(n)* – é o sinal com distorção, amostrado no domínio do tempo;

N – número de amostras contidas no sinal;

$\sum_{n=1}^{N} \left| f[n] \right|^2$ - corresponde a energia contida no sinal distorcido;

$\sum_{n=1}^{N} \left| a_j[n] \right|^2$ - corresponde a energia contida na aproximação do sinal decomposto de nível '*j*' e

$\sum_{j=1}^{J} \sum_{n=1}^{N} \left| d_j[n] \right|^2$ - corresponde a soma das energias contida nos detalhes de nível 1 ao nível '*j*'.

## 3.4 Estudo da *Wavelet* mãe utilizada no algoritmo

Para selecionar a *wavelet* mãe a ser utilizada, aquela que venha ser a melhor ajustar à análise dos distúrbios proposto neste trabalho, foi realizado um estudo com várias famílias *wavelet.* Tal estudo consistiu em analisar o comportamento dos distúrbios, tais como afundamento, elevação, interrupção, quando submetidos a estas *wavelets*. Este estudo teve como base o trabalho apresentado e defendido por Arruda *et al.*[56]. Neste estudo foram simuladas 36 situações de faltas aplicadas a 0º, e 28 situações de faltas aplicadas a 90º, caracterizando por meio destas, afundamentos, elevações e interrupções instantâneas de tensão.

Foram utilizadas 11 *wavelets* para formar o conjunto de teste, sendo as mesmas: Haar, Daubechies (ordem 4, 6, 8, 10), Symlet (ordem 8 e 16) e Coiflet (ordem 6, 12, 18). O objetivo deste estudo foi o de encontrar a melhor *wavelet* para detectar, localizar no tempo e classificar certos distúrbios relacionados à QEE.

Através da análise de tais distúrbios em AMR, foi possível identificar algumas funções *wavelets* mais adequadas para o estudo de QEE. Para a escolha da *wavelet* mãe foi levada em consideração à capacidade da mesma em distinguir entre os níveis de freqüência do sinal senoidal e do distúrbio. Logo, para esta escolha foi analisado o comportamento do sinal no primeiro nível e no quinto nível de detalhe, de onde são retiradas as características para a detecção e classificação. Assim, uma função *wavelet* que venha melhor caracterizar a ocorrência das descontinuidades nestes níveis de decomposição poderá ser usada no contexto da QEE. Cabe colocar que funções *wavelets* com formatos mais suaves indicam uma melhor resolução na freqüência quando comparada com *wavelets* que variam bruscamente em um pequeno intervalo de tempo que apresenta uma melhor resposta no domínio do tempo [56].

Na Figura 13 tem-se a representação de algumas funções w*avelet* comentadas. Nesta figura pode-se observar o comportamento destas *wavelets,* visualizando quais delas apresentam uma variação brusca e quais apresentam formatos mais suaves.

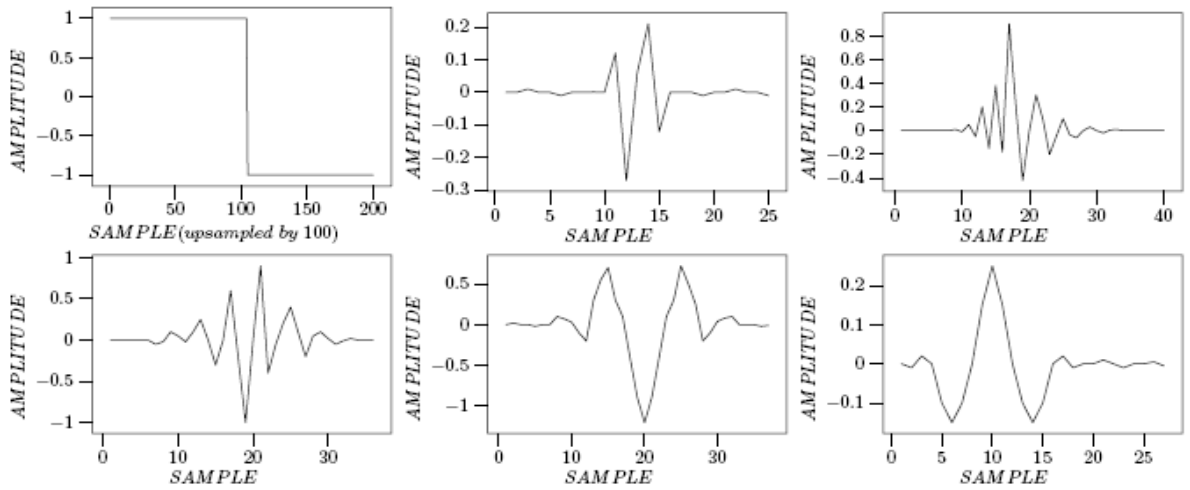


**Figura 13 – Da esquerda para a direita: funções *wavelet* dos filtros *wavelets Haar, Daubechies, Vaidyanathan, Beylkin, Coiflet e Symmlet.***

Pôde ser observado que com o aumento da ordem do filtro (aumento do suporte do mesmo) as respostas em freqüência apresentam uma melhora, devido ao comportamento em suavidade das *wavelets* mãe. Sendo assim, as *wavelets* que possuem maiores ordem, como, por exemplo, as *wavelets* de Daubechies de ordem superior a quatro e as Coiflet de ordem superior 12 apresentam melhores resultados, isto é em relação às funções *wavelets* utilizadas. Para ilustrar tal comentário, tem-se que a *Daubechies* de quarta ordem é uma das *wavelets* que vem sendo muito utilizada para a análise em SEP.

De acordo com o resultado do estudo anterior, foi empregado neste trabalho a *wavelet* db4. A mesma foi utilizada tanto na detecção dos distúrbios como na classificação dos mesmos.

# 4. ALGORITMO PROPOSTO

Este capítulo abordará, passo a passo, a metodologia aplicada, evidenciando todas as etapas envolvidas, bem como tratará da utilização das técnicas anteriormente comentadas no tocante à detecção, classificação e localização no tempo de distúrbios relacionados à QEE.

Vale adiantar que todo o algoritmo para a detecção, classificação e localização das alterações na forma de onda do sinal foi executado dispondo do *software Matlab*® [51].

## 4.1 Visão geral do projeto

A Figura 14 exibe o fluxograma que descreve o algoritmo analisador de distúrbios, o qual envolve diferentes estágios.

O primeiro estágio consiste na aquisição e condicionamento dos dados de tensão e corrente trifásicos. Tais tarefas são realizadas através de uma filtragem, digitalização e normalização condizente do sinal. Após, realiza-se a detecção das alterações manifestadas na forma de onda do sinal, podendo-se assim determinar, por exemplo, o instante de ocorrência de de-

terminado evento, ou de vários eventos sobre o sinal em análise, bem como a observação das durações associadas.

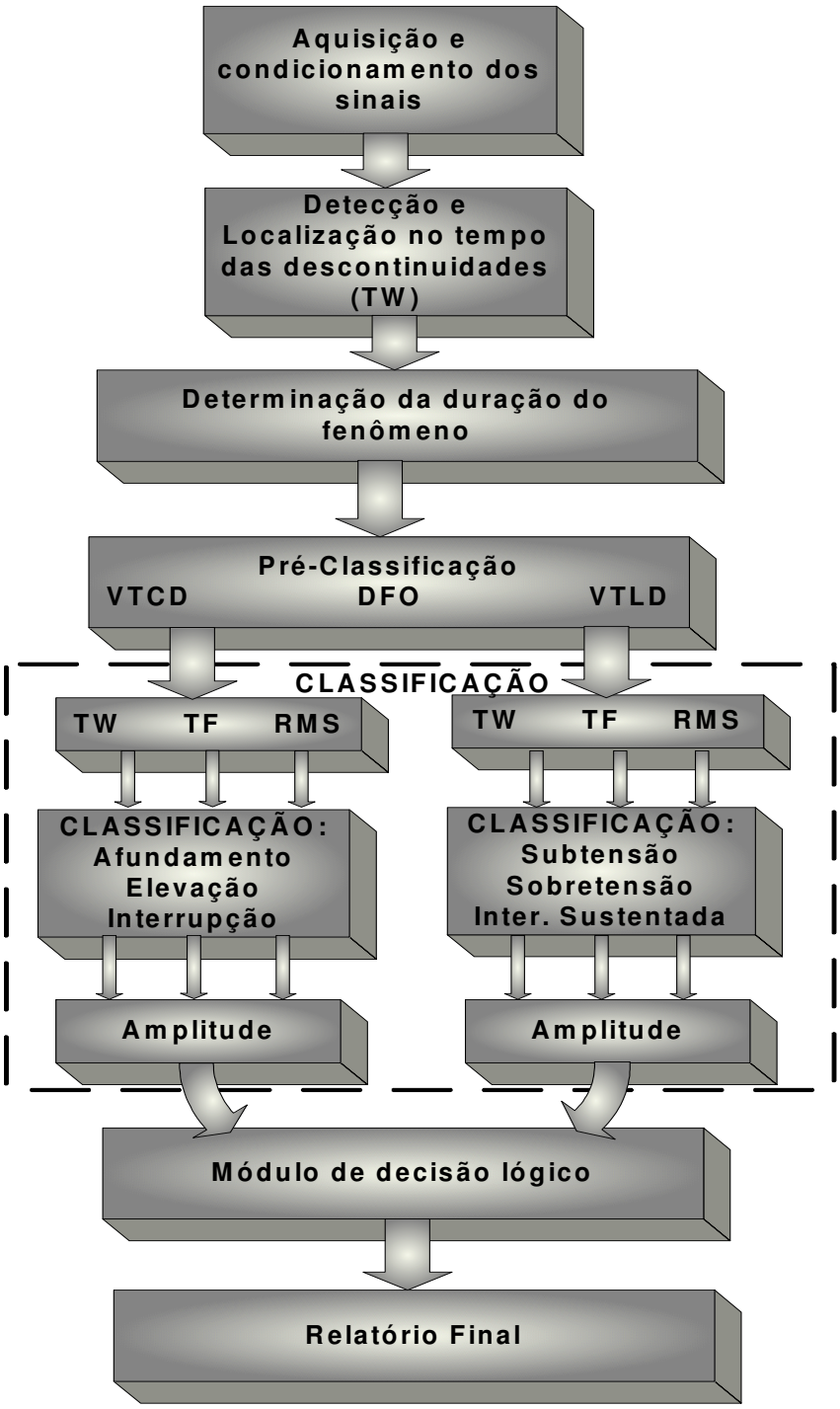


**Figura 14 - Fluxograma para a análise dos distúrbios relacionados à QEE.**

Vale adiantar que além do apontamento de instantes de tempo, busca-se caracterizar períodos de tempo sobre a forma de onda em análise, de maneira que se permita definir jane-

las de dados com tamanhos variados. Ou seja, definindo-se intervalos de tempos que caracterizem manifestações de alterações na forma de onda, será possível a definição de janelas de dados com tamanhos flexíveis. Como será posteriormente apresentado, dependendo do tamanho da janela de dados caracterizada, têm-se indícios de qual ferramenta poderá ser mais bem explorada, já que muitas apresentam limitações a este parâmetro. Com a determinação da duração do(s) evento(s) é realizada uma pré-classificação, onde os distúrbios são pré-classificados de acordo com sua duração em VTCD – Variação de Tensão de Curta Duração (instantâneo, momentâneo ou temporário), VTLD - Variação de Tensão de Longa Duração ou DFO – Desconformidade da Forma de Onda. Posteriormente a esta etapa, é realizada a classificação em relação à magnitude do sinal. Para isto, podem ser utilizadas três ferramentas: a TW, a TF e o cálculo do valor RMS. Cada uma destas ferramentas apresentará uma saída que será ponderada para a obtenção final da classificação. Na quinta etapa é determinada a amplitude do sinal. Por último é apresentado um relatório técnico que conterá sucintamente as seguintes informações: início e fim do(s) fenômeno(s), resultados da pré-classificação, classificação e a amplitude do distúrbio.

Todas as etapas e principais apontamentos pertinentes aos comentários colocados, serão apresentados no que segue.

### 4.1.1 Módulo de aquisição e condicionamento dos sinais

A aquisição dos dados é realizada através do condicionamento dos sinais provenientes dos instrumentos de medição (transformadores de corrente - TC e de potencial - TP) ou das simulações dispondo do *software* ATP [60]. Como premissa para um desejável desempenho do algoritmo como um todo, faz-se necessário que os sinais sejam aquisitados a uma freqüência igual ou superior a 7.680 Hz, como será posteriormente evidenciado e justificado.

O condicionamento dos dados é realizado através da filtragem (quando desejável), da digitalização e normalização do sinal. Na Figura 15, apresenta-se o fluxo da informação na etapa de aquisição e condicionamento dos dados para os sinais de tensão registrados.

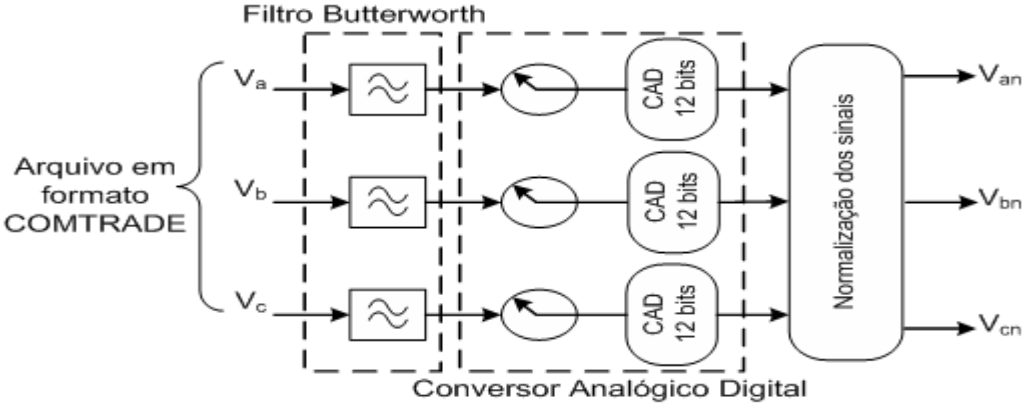


**Figura 15 - Fluxo da informação na etapa de aquisição e condicionamento dos dados**

Vale ressaltar que os arquivos de dados, sejam provenientes dos transdutores ou das simulações dispondo do *software* ATP, estão sendo considerados em um formato padrão designado por COMTRADE (*Common Format for Transient Data Exchange for Power System*), desenvolvido pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) inicialmente em 1991 [56] e revisado em 1999 [57]. Este padrão define um formato comum para os arquivos de dados e meio de troca necessários para o intercâmbio de vários tipos de falta, teste, e simulação de dados [57].

#### 4.1.1.1 O arquivo COMTRADE

Apenas como apontamento elucidativo, vale colocar que cada arquivo COMTRADE registrado possui um conjunto de três arquivos associados a ele. Cada um destes três arquivos transporta uma classe de informação. Estes três arquivos são os seguintes [57]:

a) cabeçalho;

b) configuração e

c) dados.

Todos os arquivos do conjunto devem ter o mesmo nome, diferindo apenas pelas extensões que indicam o tipo de arquivo. A designação dos arquivos possui o seguinte formato: "*nome.ext"*. Onde *nome* é usado para identificar o arquivo e *ext* para determinar o tipo de arquivo. As extensões são as seguintes: ".HDR" para o arquivo cabeçalho, ".CFG" para o arquivo configuração e ".DAT" para o arquivo de dados. O nome do arquivo é limitado a oito caracteres e a extensão a três caracteres. Para maiores informações desta notação, sugere-se uma consulta a referencia [57].

**a) Arquivo Cabeçalho (nome.HDR)**

O arquivo "cabeçalho" é um arquivo de texto ASCII (*American Standard Code for Information Interchange)* opcional, criado pelo gerador de dados COMTRADE. A intenção é que os dados possam ser entendidos e impressos pelo usuário, ou seja, traz uma informação suplementar para que o usuário entenda melhor a condição dos transitórios registrados. Este arquivo não será processado pelo programa de aplicação. Vale comentar que se pode incluir qualquer informação em qualquer ordem neste arquivo.

**b) Arquivo Configuração (nome.CONF)**

O arquivo "configuração" é um arquivo de texto ASCII para ser lido por um programa computacional. Deve ser salvo em um formato específico. Este arquivo contém informação necessária para que um programa possa interpretar o arquivo de dados corretamente (.DAT). As informações contidas neste arquivo são:

- Nome da estação, identificação do equipamento de gravação, e ano da revisão do padrão COMTRADE.
- Número e tipo de canais (analógico ou digital);
- Nome do canal, unidade e fator de conversão;

- Freqüência da linha;
- Taxa de amostragem e número de amostras;
- Data e hora da primeira amostra;
- Data e hora do momento de *trigger*;
- Tipo do arquivo de dados;
- Tipo de arquivo ".DAT" (Binário ou ASCII).

c) **Arquivo Dados (*nome*.DAT)**

O arquivo de dados contém o valor numérico para cada canal de entrada de cada amostra no registro. Os dados devem corresponder exatamente ao formato definido no arquivo de configuração, a fim de que os dados possam ser lidos pelo programa. O campo "tipo de arquivo" do arquivo configuração define o tipo de dados utilizados, sejam estes binários ou ASCII.

Vale comentar que para este trabalho o arquivo de dados considerado está no formato ASCII. Neste arquivo os dados são separados em linhas e colunas. O número de linhas varia de acordo com o número de amostras, determinando o tamanho do arquivo. Cada linha possui $m+2$ colunas, onde $m$ é o total de canais, e as outras duas colunas são o número da amostra e a estampa de tempo. O número de colunas é dependente do sistema de gravação e interfere no tamanho do arquivo.

O formato do arquivo de dados deve seguir as seguintes características:

- A primeira coluna deve conter o número da amostra;
- A segunda coluna contém o tempo da amostra, em μs;
- A terceira e demais colunas contêm os valores das amostras de tensão, corrente e estado.

Os valores das amostras são representados no formato inteiro com no máximo de seis caracteres e separados por vírgulas. Valores inexistentes são representados como 99999. Para

os canais digitais, as informações serão válidas somente se forem representadas por zero ou um.

#### 4.1.1.2 Filtragem do sinal

A fim de garantir uma correta digitalização do sinal, é necessária uma correta filtragem do sinal para que não ocorra o fenômeno de sobreposição de espectro ou *aliasing*. De acordo com [58], "para que uma determinada freqüência *f1* de um sinal analógico possa ser completamente reconstruída, a taxa de amostragem no processo de digitalização deve ser no mínimo igual a 2 x *f1*, onde *f1* é reconhecida como Freqüência de *Nyquist*".

Para isto, é utilizado um filtro passa - baixa com freqüência de corte igual à metade da taxa amostral desejada. O filtro utilizado foi modelado segundo a aproximação *Butterworth* de segunda ordem. A escolha deste filtro foi devida ao mesmo apresentar uma resposta em freqüência que é o mais plano possível na faixa passante, e uma resposta decrescente, na banda de rejeição [59].

#### 4.1.1.3 Digitalização do sinal.

Após a filtragem do sinal é realizada a digitalização do mesmo. O processo de digitalização utiliza um Conversor Analógico Digital (CAD) de 12 bits, com freqüência de amostragem de 7680 Hz.

Ressalta-se que neste trabalho, tanto a ordem do filtro, como a quantidade de *bits* utilizados no algoritmo podem ser escolhidos pelo usuário final.

#### 4.1.1.4 Normalização do sinal.

O objetivo e ganho quando da normalização, é padronizar os dados obtidos do sistema elétrico monofasicamente, independente do nível de tensão analisado [60]. Ou seja, o sinal é

normalizado de acordo com a tensão fase terra nominal do sistema em análise. A Figura 16 ilustra o procedimento de normalização dos dados coletados.

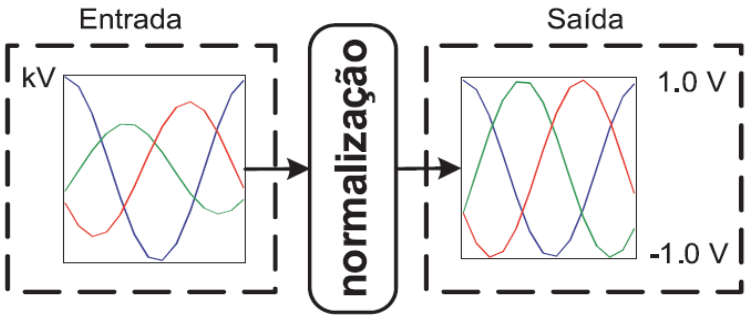


**Figura 16 – Fluxograma de normalização dos dados**[1]

### 4.1.2 Módulo de detecção e localização no tempo das alterações na forma de onda

Nesta pesquisa é realizada a detecção e localização no tempo das alterações na forma do sinal pela aplicação da TW e conseqüente AMR. Neste sentido, procura-se evidenciar e apontar qualquer mudança e/ou descontinuidade no comportamento do sinal. Ou seja, o algoritmo realiza nada mais que a divisão do sinal em análise, separando-o em pedaços, indicando quando da ocorrência das alterações na forma de onda em análise. Através da análise dos coeficientes do primeiro nível de detalhe provenientes da AMR, estas alterações podem ser observadas. Vale colocar que pela lógica implementada, uma mudança é caracterizada quando uma amostra ultrapassa o limiar empiricamente pré-estabelecido de 0,016. Assim, caso o sinal em análise apresente uma, duas, ou mais alterações na sua forma de onda, a lógica estará apta para apontar temporalmente tal(is) ocorrência(s), permitindo ainda, um ajuste e direcionamento adequado da(s) janela(s) de dados. Como colocado, por este ajuste, viabiliza-se uma janela de dados adaptativa, com grande flexibilidade e um melhor desempenho ao conjunto de ferramentas disponíveis (TW, AMR, TRF, RMS, LF, etc.).

---

[1] Extraído de [60]

Para exemplificar o que seria estas alterações no sinal, têm-se as figuras 17 (a) e (b). A figura17 (a) ilustra uma situação resultante de uma de falta monofásica envolvendo a fase "A" com conexão a terra (A-T), com resistência de falta de 0,01Ω e ângulo de incidência de 90º. Na figura 17 (b) são representados os coeficientes de detalhe do primeiro nível de decomposição do sinal em análise.

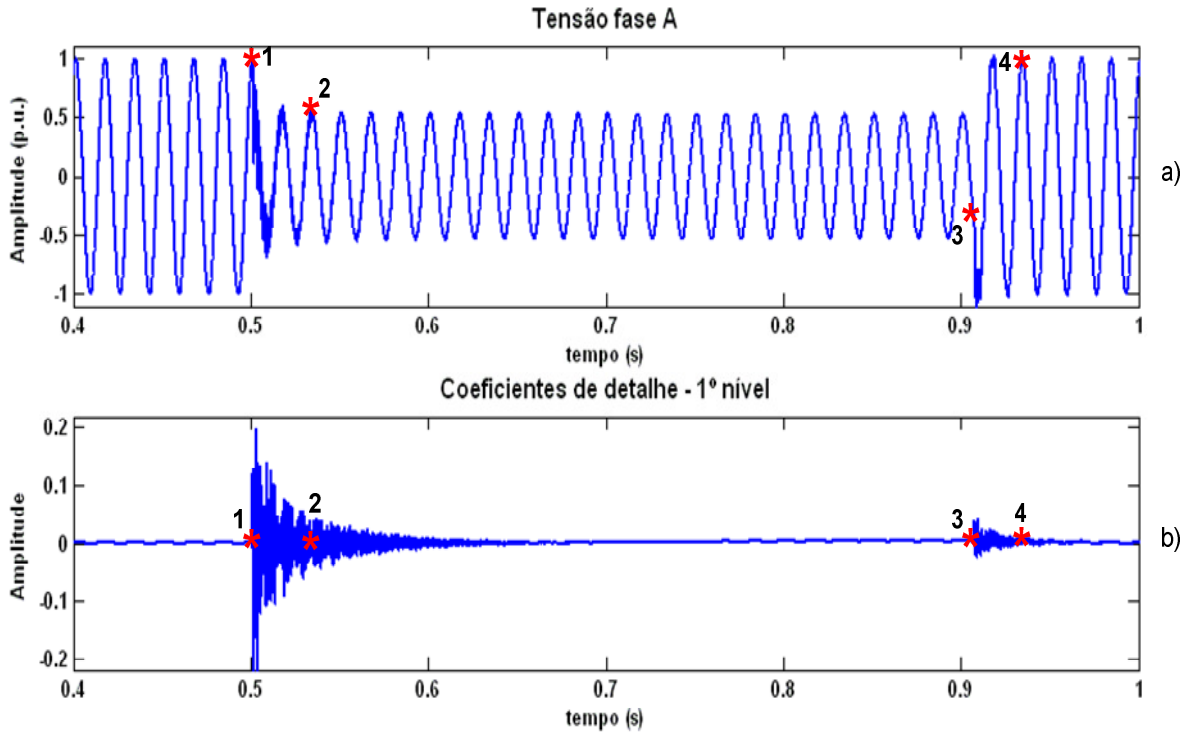


**Figura 17 – a) Sinal elétrico caracterizando um afundamento de tensão na fase A; b) Coeficientes do primeiro nível de detalhe do sinal em análise.**

Nesta figura, enumeram-se os pontos 1, 2, 3 e 4 onde ocorreram as alterações na forma de onda. Pode-se notar que, como evento de maior predominância (quanto à duração), tem-se um afundamento (entre os pontos 2 e 3). Contudo, antes do início deste, entre os pontos 1 e 2, e após o fim do mesmo (entre os pontos 3 e 4), evidencia-se uma pequena oscilação transitória. Sendo assim, sobre o sinal em análise, tem-se a ocorrência de três eventos subseqüentes. Vale ilustrar que caso o sinal em análise contenha um fenômeno qualquer, precedido por uma oscilação transitória, tanto o início, quanto o final da oscilação, poderão ser evidenciados pelo primeiro nível de detalhe, conforme ilustrado pela figura 17 (b).

Para ilustrar os passos da detecção, tem-se a figura 18 que caracteriza uma situação de elevação da tensão de 1,35 p.u., decorrente da falta fase "A" – Terra anteriormente citada. Inicialmente, uma janela de dados contendo a informação de um ciclo (freqüência de amostragem de 7.680 Hz, com 128 amostras por ciclo), irá percorrer o sinal em análise. Tal deslocamento se dará por um passo de deslocamento igual a 1/4 de ciclo, considerando-se a freqüência de 60 Hz do sistema em análise. Sobre cada janela de dados disponibilizada, aplica-se então a TW, com a *wavelet* mãe db4 e a AMR referente ao nível 1. Assim, analisando-se os coeficientes de detalhes de cada janela, pode-se determinar o início de qualquer alteração na forma de onda, apontado pela ultrapassagem do limiar de 0,016 pré-estabelecido.

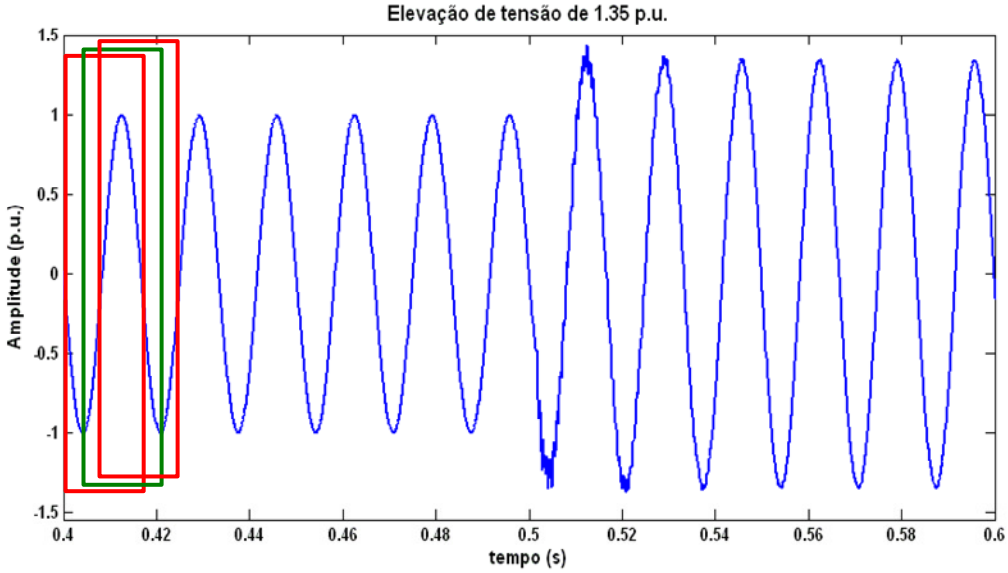


**Figura 18 – Sinal de tensão com presença de uma elevação de tensão.**

Sendo assim, enquanto o sinal estiver em regime permanente, o módulo de detecção não acusará nenhum tipo de distúrbio, pois os coeficientes de detalhe do primeiro nível não ultrapassarão o limiar estipulado.

Quando ocorrer alguma alteração sobre o sinal janelado, esta alteração será evidenciada no primeiro nível de detalhe da AMR. Após a detecção do inicio de um evento, o algoritmo

irá buscar por outros pontos que poderão acusar o fim e/ou outra alteração na forma de onda do sinal em análise. Assim, todas as descontinuidades e/ou alterações do sinal poderão ser identificadas e estampadas no tempo para a definição do tamanho das janelas de dados a serem posteriormente processadas.

Na figura 19 é apresentada uma janela de dados deslizante, onde foi aplicado a TW. A mesma contem os coeficientes do primeiro nível de detalhe do sinal analisado.

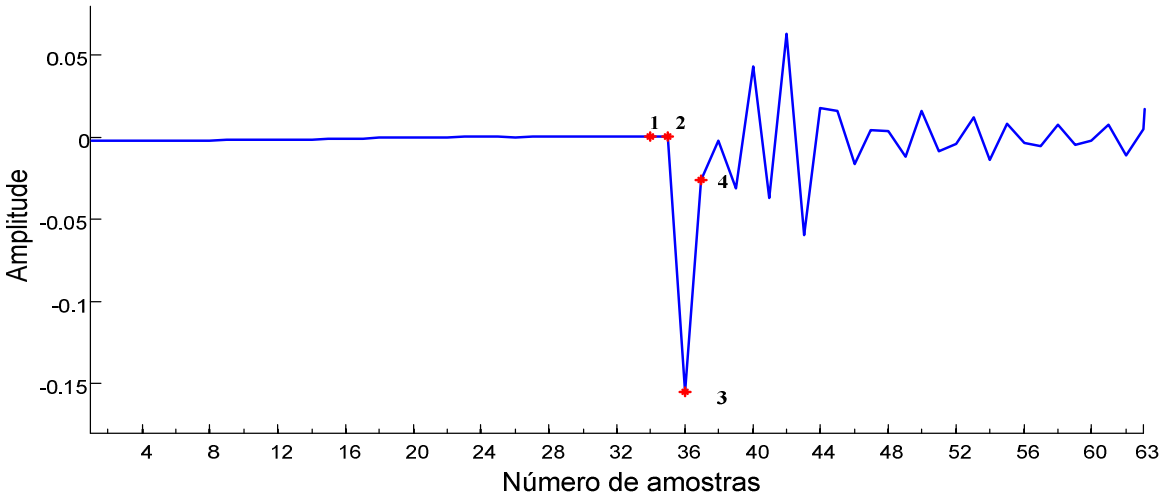


**Figura 19 - Coeficientes do primeiro nível de detalhe do sinal com afundamento**

Inicialmente para cada janela deslizante analisada, é verificado se a mesma possui alguma amostra cujo módulo seja superior ao primeiro limiar pré-definido $L_1$ (neste estudo de 0,0016). Quando da ocorrência superior a este limiar, tem-se então determinada à janela em que ocorreu o distúrbio. De acordo com a ilustração, pode-se ver que inicialmente os coeficientes apresentam valores que não possuem uma grande variação entre si. A partir de certo instante, estas amostras apresentam uma variação abrupta, ultrapassando assim o primeiro limiar. Identificada esta janela, o próximo passo é determinar qual amostra da mesma representa o início da alteração na forma de onda em análise. Para isso, é realizada uma subtração de dois pares de amostras consecutivas, x(n+2) – x(n+1) e x(n+1) – x(n). Caso a subtração das mesmas for superior aos limiares estabelecidos $L_2$ e $L_3$, (primeira subtração: $L_2$= 0,00016 e

segunda subtração: $L_3$ =0,0008), é determinado então o ponto que representa o início da descontinuidade. Com a determinação do coeficiente que representa a alteração na forma de onda, tem-se então associada à localização do mesmo no tempo.

Para exemplificar a determinação deste ponto, têm-se os pontos 1, 2, 3 e 4 apresentados na Figura 19. Realizando a subtração das três primeiras amostras consecutivas, pontos 1, 2 e 3, tem-se que para a primeira subtração x(3) – x(2), o seu resultado é superior ao limiar $L_2$, mas na segunda subtração x(2) – x(1), o resultado é inferior ao limiar $L_3$. Isto significa que o ponto 1 não é um ponto que caracteriza uma alteração abrupta no sinal em análise. Considerando os pontos 2, 3 e 4, tem-se que as subtrações x(4)-x(3) e x(3)-x(2) possuem resultados que ultrapassam os limiares $L_2$ e $L_3$. Logo, o ponto 2 representa o ponto onde ocorreu uma alteração abrupta no sinal analisado e este passa a estar associado ao instante inicial do evento.

A Figura 20 (a) ilustra um sinal que apresenta um afundamento de tensão evidenciado sobre a fase "A" e na Figura 20 (b) tem-se a representação dos coeficientes de detalhe deste mesmo sinal. Em ambas as figuras têm-se a representação da detecção do início e do fim da primeira descontinuidade. Verifica-se por estas figuras que o apontamento da segunda descontinuidade está caracterizando o início do afundamento de tensão manifestado sobre o sinal em análise. Com isso o algoritmo tentará localizar o fim desta outra descontinuidade, e assim por diante. Isso irá ocorrer até a finalização do arquivo de dados apresentado. Pelas Figuras 17 (a) e 17 (b), pode-se ver que o ponto 2 representa o fim do primeiro evento e ao mesmo tempo o início do segundo evento, do mesmo modo isto será verdade para os demais pontos subseqüentes.

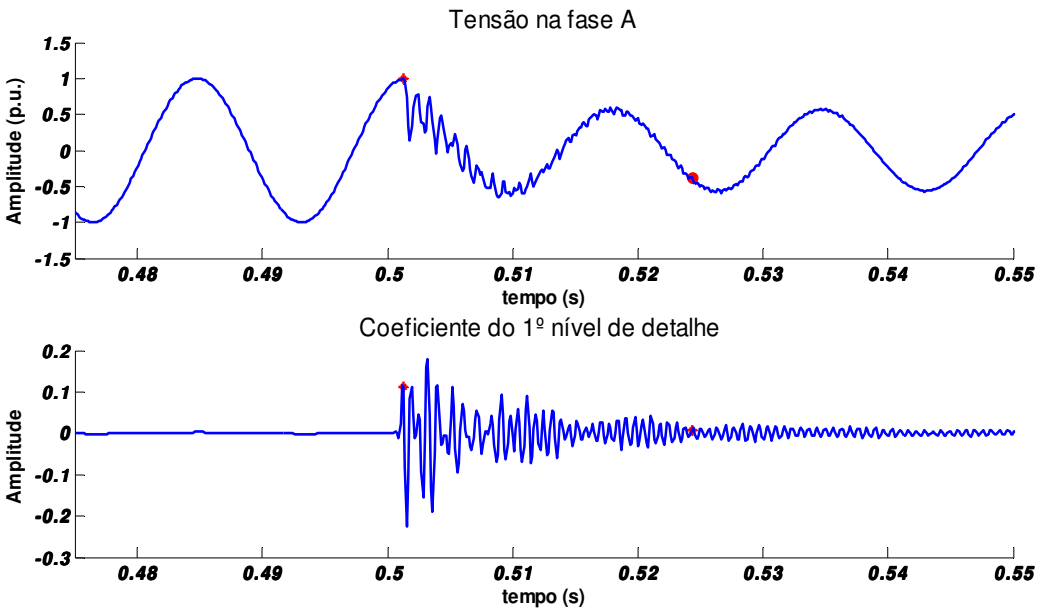


**Figura 20 – a) Sinal caracterizando um afundamento na fase "A" e b) os coeficientes do primeiro nível de detalhe.**

Pelas figuras apresentadas, nota-se que os coeficientes apresentam um período transitório, de acomodação, e que este período está associado ao instante transitório do sinal. Para detectar o fim deste transitório, outra subtração é realizada, denotando novos valores de limiares, permitindo apontar o fim da descontinuidade. Estes limiares foram obtidos empiricamente através da análise dos diversos casos testados para o sistema elétrico real que será apresentado no Capítulo 5.

Após a detecção dos pontos de alterações, o algoritmo é direcionado automaticamente para o próximo passo, que é o módulo de determinação da duração das descontinuidades evidenciadas.

### 4.1.3 Módulo de determinação da duração das descontinuidades.

Os distúrbios de VTCD e de VTLD têm como característica um início e um fim, permitindo assim a determinação da sua duração. Com a determinação dos pontos de alteração na forma de onda e com a sua localização temporal, pode-se determinar a duração dos eventos.

De maneira similar, após a detecção da primeira descontinuidade, o sinal continuará sendo analisado via uma janela de dados de um ciclo, com um deslocamento de ¼ de ciclo. Quando da extrapolação do limiar de 0,0016, pela seqüência lógica implementada, a segunda e demais descontinuidades serão apontadas.

Por esta abordagem, pode-se então separar os fenômenos em função dos períodos de duração apontados, sendo viável, por exemplo, a distinção entre os fenômenos transitórios (de curtíssima duração) dos principais (de maior duração – VTCD e VTLD). Desta maneira, uma distinta classificação poderá ser aplicada a cada janela de dados definida. Vale ressaltar que, dependendo do tamanho (duração) de cada período apontado e, conseqüentemente, do tamanho da janela de dados, teremos a escolha mais adequada de qual ferramenta irá melhor responder ao observado.

### 4.1.4 Módulo de pré-classificação.

Com a determinação da duração das alterações na forma de onda, o algoritmo faz uma pré-classificação dos eventos. Se a duração dos mesmos for superior a 1 minuto, o algoritmo os classifica em VTLD, caso contrário, os mesmos podem ser classificados como VTCD.

Nos casos de VTCD, os eventos podem ser ainda sub-classificados em: momentâneo (1 ciclo a 3 segundos) e temporário (3 segundos a 1 minuto).

Os eventos que possuírem uma duração associada menor do que 0,5 ciclos são classificados como *Desconformidade na Forma de Onda* (DFO), merecendo um posterior tratamento.

Após a pré-classificação dos eventos, o algoritmo é automaticamente direcionado para o módulo de classificação.

### 4.1.5 Módulo de Classificação

Após a detecção e a pré-classificação das alterações na forma de onda, realiza-se a classificação propriamente dita. Para a classificação serão empregadas três distintas ferramentas: a transformada *Wavelet* discreta, a transformada rápida de *Fourier* e o valor RMS. Neste módulo também é realizado o cálculo da amplitude do evento. Este valor, quando da análise em função do valor RMS e/ou da TRF, será utilizado para a classificação do evento.

#### 4.1.5.1 Classificação via valor RMS

Esta ferramenta será direcionada para a análise dos eventos pré-classificados como VTCD e VTLD. De posse do ponto inicial e final do evento, tem-se mapeado no tempo a ocorrência. Dispondo-se de um ciclo deste sinal, é calculado o valor RMS e realizado a classificação do evento, comparando-se este valor aos limites apresentados na Figura 21(a).

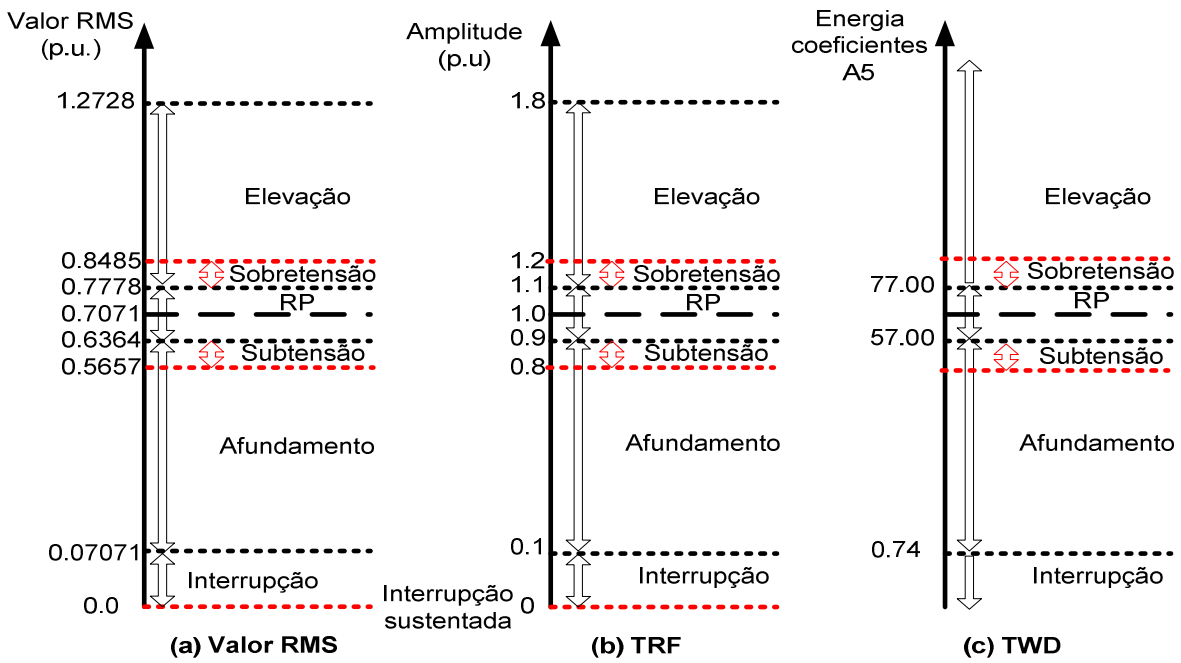


**Figura 21 – Faixas utilizadas na etapa de classificação com a) o Valor RMS; b) TRF e c) TWD.**

Para melhor exemplificar esta classificação, tem-se o fluxograma apresentado na Figura 22.

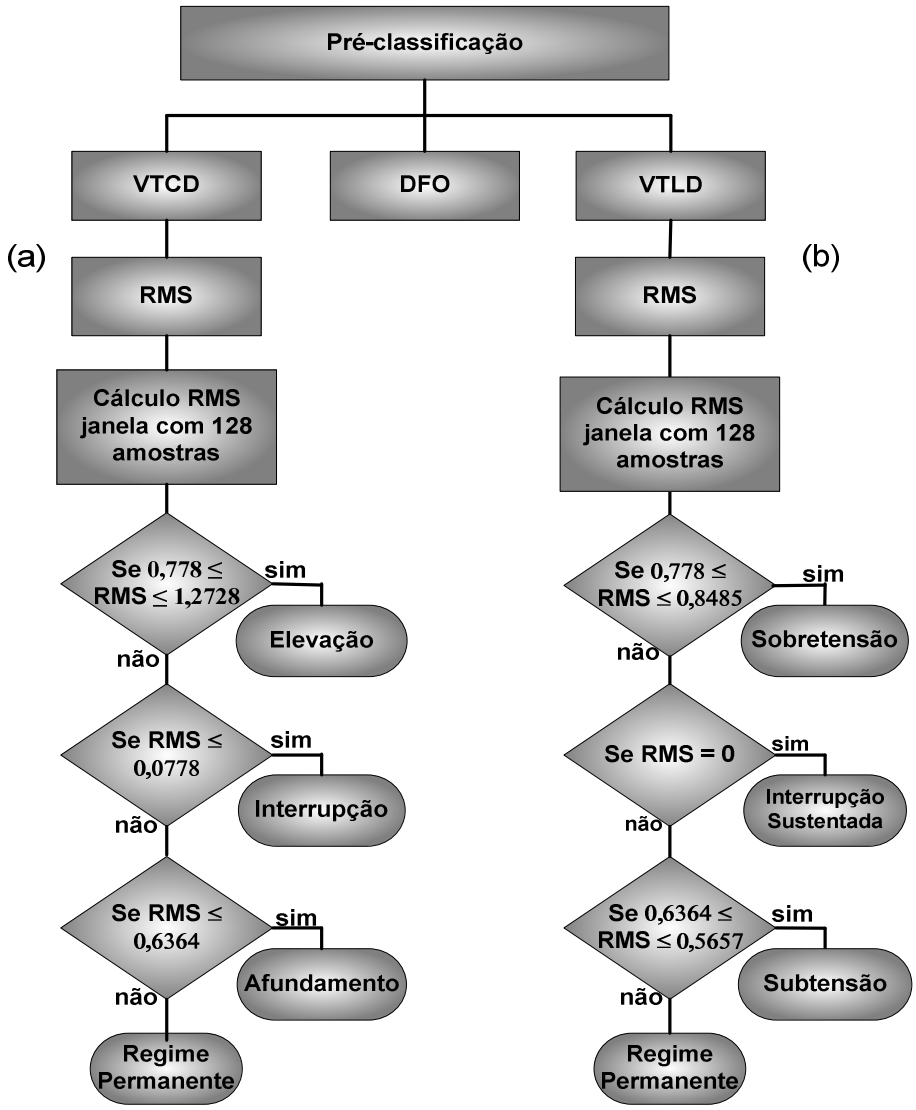


**Figura 22 – Fluxograma para a classificação dispondo do valor RMS para os eventos pré-classificados como (a) VTCD e (b) VTLD**

De acordo com as Figuras 21(a) e 22(a), para os casos pré-classificados como VTCD, tem-se:

- Se o valor 0,7778 ≤ RMS ≤ 1,2728, o evento será classificado como elevação.
- Se o valor RMS < 0,07071, o evento é classificado como interrupção.

- Se 0,07071 ≤ valor RMS ≤ 0,6364, o evento será classificado como afundamento.

Já para os casos pré-classificados como VTLD (Figura 21 (a) e 22 (b)), tem-se:

- Se 0,7778 ≤ valor RMS ≤ 0,8485, o evento é classificado como sobretensão.
- Se 0,5657 ≤ valor RMS ≤ 0,6364, o evento é classificado como subtensão.
- Se valor RMS = 0, o evento é classificado como interrupção sustentada.
- E os casos onde o valor RMS estiver entre 0,6364 e 0,7778, serão considerados como Regime Permanente (RP).

#### *4.1.5.2 Módulo de Classificação via TRF*

A classificação das VTCDs dispondo da TRF é realizada para duas situações em função da pré-classificação apontada. O fluxograma apresentado na Figura 23 apresenta estas duas situações.

Para os eventos pré-classificados como DFO e VTLD, a classificação é realizada somente para uma situação, representada pelas Figuras 24 (a) e (b), respectivamente.

Todas as situações apontadas estão relacionadas com a duração dos eventos.

Analisando inicialmente os casos pré-classificados como VTCD, tem-se que a duração dos mesmos pode variar de 1 ciclo a 1 minuto. Desta forma, a primeira situação seria se o evento possuir duração maior que um ciclo e inferior a 2 ciclos. Esta situação é ilustrada no fluxograma da Figura 23(a).

Para esta situação, além de ser analisada a amplitude da tensão na freqüência fundamental, é também verificado o conteúdo espectral de todas as freqüências envolvidas. Este conteúdo espectral é avaliado através do calculo da Distorção Harmônica Total (DHT) [48].

$$DHT = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{n_{máx}} V_n^2}{V_1}} \tag{12}$$

Conforme apresentado na figura 23(a), tem-se que:

- Se a amplitude for ≥ 1,1 e se a DHT ≥ 0,49, o evento será classificado como elevação com oscilação transitória amortecida.
- Se a amplitude for ≥ 1,1 e se a DHT ≤ 0,49, o evento será classificado como elevação.
- Se 0,1 ≤ amplitude ≤ 0,9 e se a DHT ≥ 0,49, o evento será classificado como afundamento com oscilação transitória amortecida.
- Se 0,1 ≤ amplitude ≤ 0,9 e se a DHT ≤ 0,49, o evento será classificado como afundamento.
- Se a amplitude for ≤ 0,1 e se a DHT ≥ 0,49, o evento será classificado como interrupção com oscilação transitória amortecida.
- Se a amplitude for ≤ 0,1 e se a DHT ≤ 0,49, o evento será classificado como interrupção.
- Se 0,9 < amplitude < 1,1 e se a DHT ≥ 0,49, o evento será classificado como oscilação transitória.
- Se 0.9 < amplitude < 1,1 e se a DHT ≤ 0.49, o evento será classificado como Regime Permanente (RP).

A segunda situação seria para os eventos com duração superior a dois ciclos. Nesta situação é analisado tanto o primeiro como o segundo ciclo do mesmo. Para cada janela é calculado o valor da distorção harmônica e verificado se ocorre uma variação deste valor de uma janela para outra. Esta análise é realizada inicialmente para saber se existe alguma

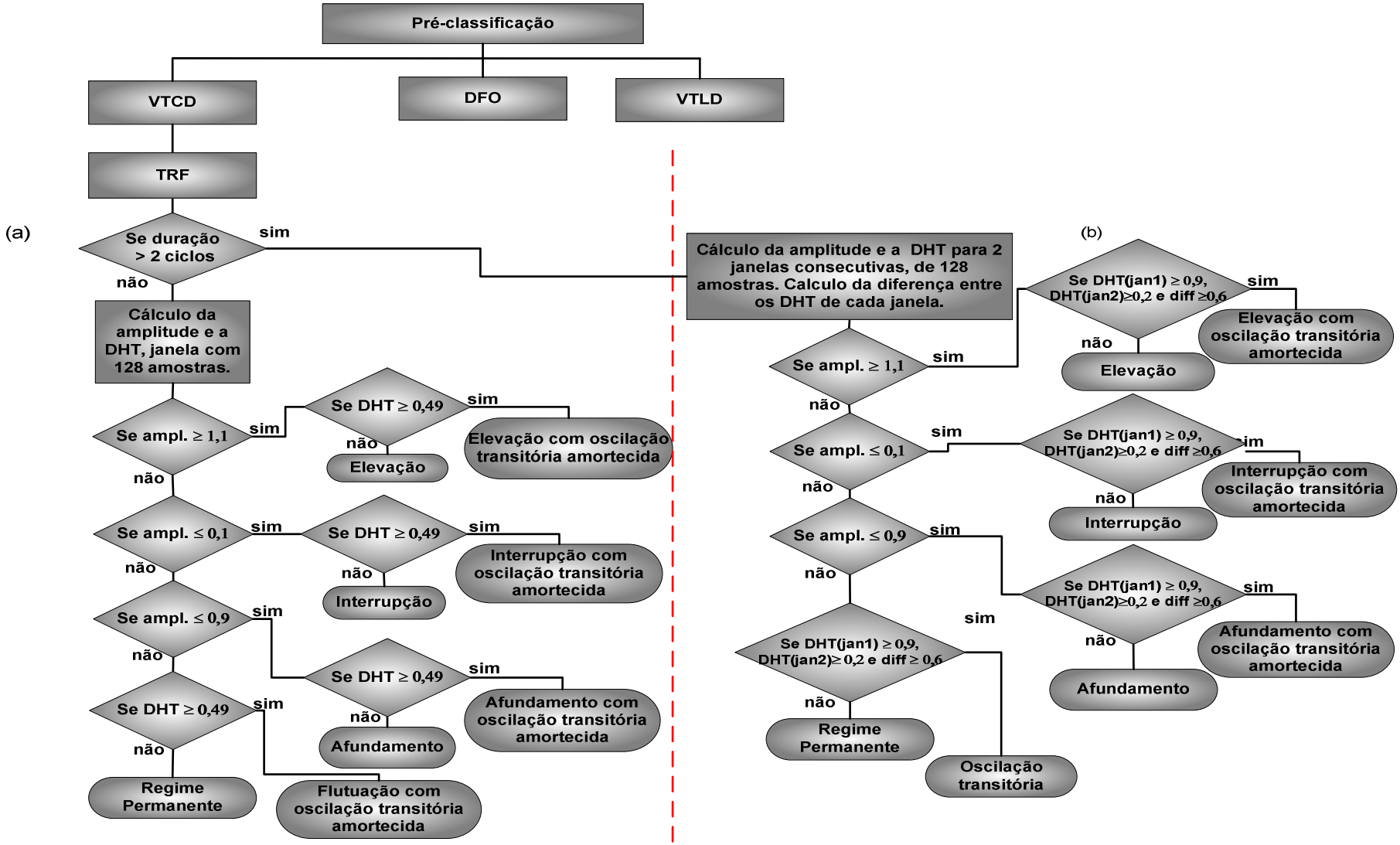


**Figura 23 – Fluxograma para a classificação dos fenômenos pelo emprego da TRF, para os pré-classificados como VTCD caracterizados por (a) uma janela de dados de um ciclo e (b) por uma janela maior do que dois.**

freqüência diferente da de 60 Hz, e se existir, verificar se a mesma foi amortecida, ou se continua a aumentar. Assim de acordo com o apresentado no fluxograma da Figura 23(b), os eventos podem ser classificados como:

- Se a amplitude for ≥ 1,1 e se DHT(jan1) ≥ 0,90 e DHT(jan2) ≥ 0,20 e diff ≥ 0,60, o evento será classificado como elevação com oscilação transitória amortecida.
- Se a amplitude for ≥ 1,1 e se a condição for "não" para a DHT(jan1) ≥ 0,90 e DHT(jan2) ≥ 0,20 e diff ≥ 0,60,ou seja, se algumas destas três variáveis não atender ao especificado, o evento será classificado como elevação.
- Se 0,1 ≤ amplitude ≤ 0,9 e se DHT(jan1) ≥ 0,90 e DHT(jan2) ≥ 0,20 e diff ≥ 0,60, o evento será classificado como afundamento com oscilação transitória amortecida.
- Se 0,1 ≤ amplitude ≤ 0,9 e se a condição for "não" para a DHT(jan1) ≥ 0,90 e DHT(jan2) ≥ 0,20 e diff ≥ 0,60, o evento será classificado como afundamento.
- Se a amplitude for ≤ 0,1 e se DHT(jan1) ≥ 0,90 e DHT(jan2) ≥ 0,20 e diff ≥ 0,60, o evento será classificado como interrupção com oscilação transitória amortecida.
- Se a amplitude for ≤ 0,1 se a condição for "não" para a DHT(jan1) ≥ 0,90 e DHT(jan2) ≥ 0,20 e diff ≥ 0,60, o evento será classificado como interrupção.
- Se 0,9 < amplitude < 1,1 e se DHT(jan1) ≥ 0,90 e DHT(jan2) ≥ 0,20 e diff ≥ 0,60, o evento será classificado como flutuação com oscilação transitória amortecida.

- Se 0,9 < amplitude < 1,1 e se a condição for "não" para a DHT (jan1) ≥ 0,90 e DHT(jan2) ≥ 0,20 e diff ≥ 0,60, o evento será classificado como regime permanente.

Para os eventos classificados como DFO, serão somente analisados aqueles que possuem duração maior que meio ciclo e menor que um ciclo. Para este caso, analisa-se somente o conteúdo espectral das freqüências diferentes da fundamental. Após o cálculo deste valor é verificado se o mesmo ultrapassa o limiar de 5% com relação à componente fundamental do sinal de tensão em análise. Caso afirmativo, o evento será classificado como oscilação transitória, se não, classificado como uma desconformidade na forma de onda. Esta etapa é apresentada pelo fluxograma da Figura 24(a).

Para as VTLDs, o procedimento para a classificação está ilustrado na Figura 24(b). Esta classificação é realizada da mesma forma que os casos de VTCD com duração superior a dois ciclos. O diferencial para estes casos de VTLD são os limiares quanto à amplitude. Estes limiares podem ser observados nas Figuras 21 e 24, item (b).

#### 4.1.5.3 Classificação via TWD

Para os distúrbios pré-classificados em VTCD e VTLD, a janela contendo o distúrbio é decomposta até o quinto nível pela TWD. Utiliza-se o quinto nível de aproximação por este conter a freqüência em 60 Hz, como faixa central, na qual se evidenciam os fenômenos de VTCD e VTLD. De posse dos coeficientes da quinta aproximação e do primeiro e segundo detalhe, calcula-se a energia para cada nível, sendo EA5, ED1 e ED2, as energia respectivas à quinta aproximação e aos detalhes 1 e 2. Após o cálculo destes valores, é realizada a classificação do evento. Na Figura 21(c), podem-se observar os limiares para a aproximação do quinto nível. A Figura 25 ilustra a metodologia para a classificação das VTCD.

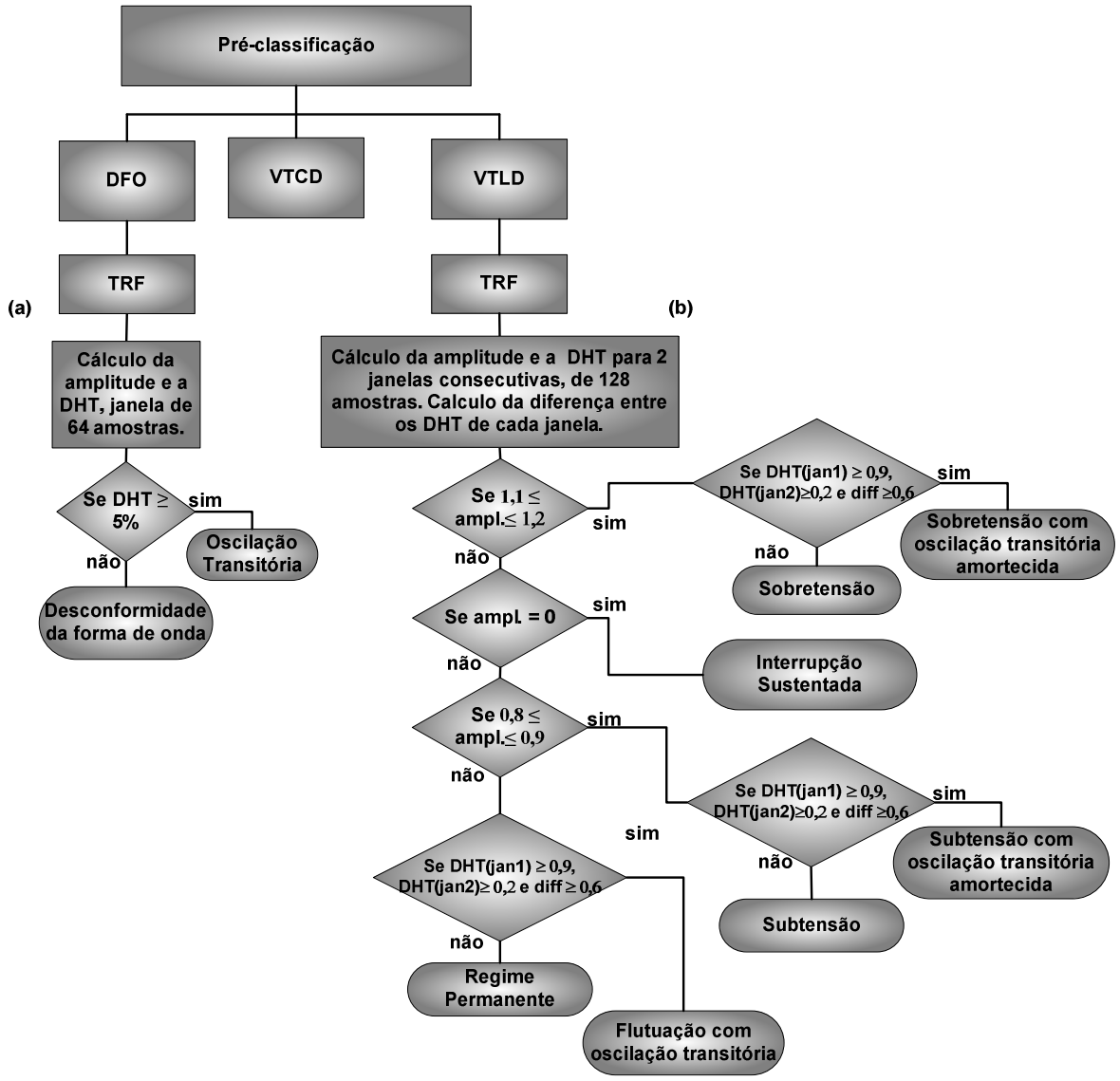


**Figura 24 – Fluxograma para a classificação com a TRF para os eventos pré-classificados como (a) DFO e (b) VTLD**

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 25, tem-se que os eventos podem ser classificados nas mesmas categorias apresentadas na classificação com a TRF: Assim,

- Se EA5 ≥ 76 e se (ED1 ≥ 0,0038 e ED2 ≥ 0,0035), o evento será classificado como elevação com oscilação transitória amortecida.
- Se EA5 ≥ 76 e se a condição for "não" para (ED1 ≥ 0,0038 e ED2 ≥ 0,0035), o evento será classificado como elevação.

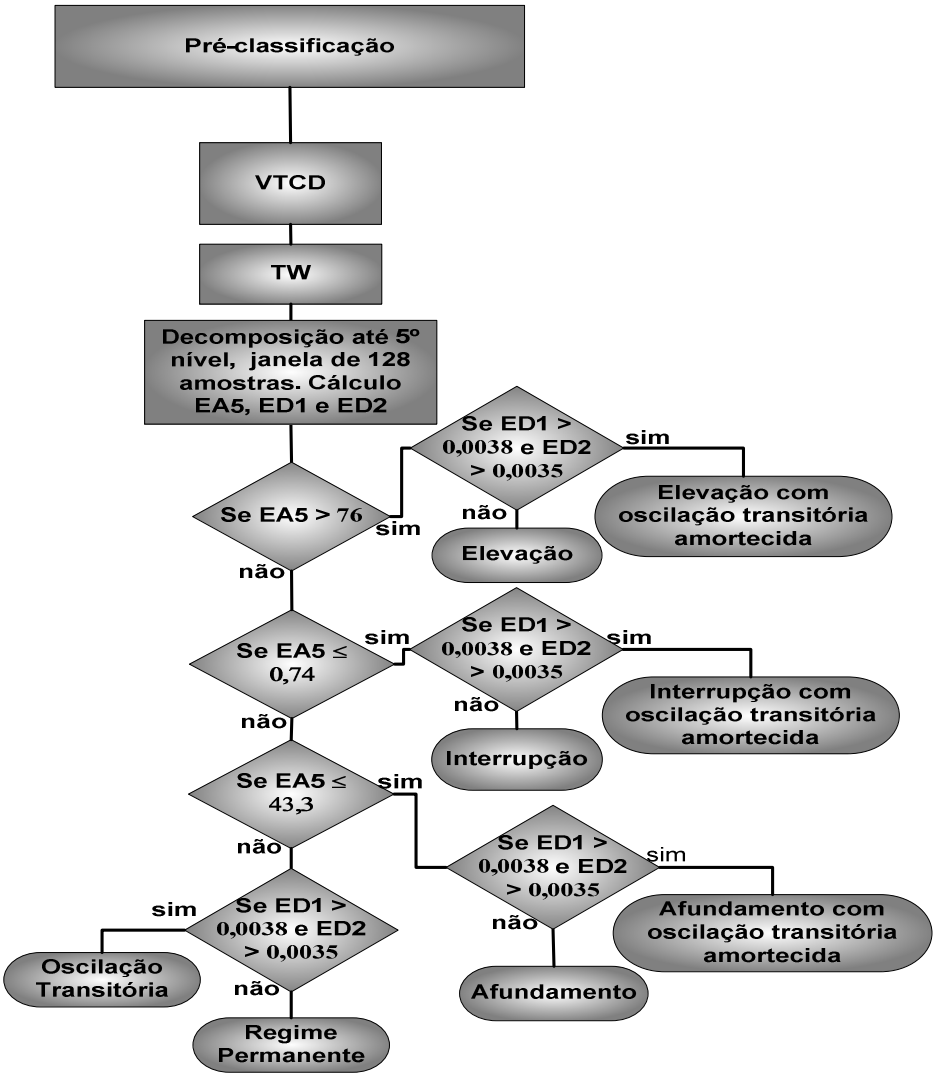


**Figura 25 – Fluxograma para a classificação dos distúrbios dispondo da TW para os pré-classificados como VTCD.**

- Se 0,74 ≤ EA5 ≤ 43,3 e se (ED1 ≥ 0,0038 e ED2 ≥ 0,0035), o evento será classificado como afundamento com oscilação transitória amortecida.
- Se 0,74 ≤ EA5 ≤ 43,3 e se a condição for "não" para (ED1 ≥ 0,0038 e ED2 ≥ 0,0035), o evento será classificado como afundamento.
- Se EA5 ≤ 0,74 e se (ED1 ≥ 0,0038 e ED2 ≥ 0,0035), o evento será classificado como interrupção com oscilação transitória amortecida.
- Se EA5 ≤ 0,74 e se a condição for "não" para (ED1 ≥ 0,0038 e ED2 ≥ 0,0035), o evento será classificado como interrupção.

- Se 43,3 < EA5 < 76 e se (ED1 ≥ 0,0038 e ED2 ≥ 0,0035), o evento é classificado como flutuação com oscilação transitória amortecida.
- Se 43,3 < EA5 < 76 e se a condição for "não" para (ED1 ≥ 0,0038 e ED2 ≥ 0,0035), o evento será classificado como regime permanente (RP).

Para os eventos DFO, de acordo com a Figura 26, a TW apresenta duas soluções.

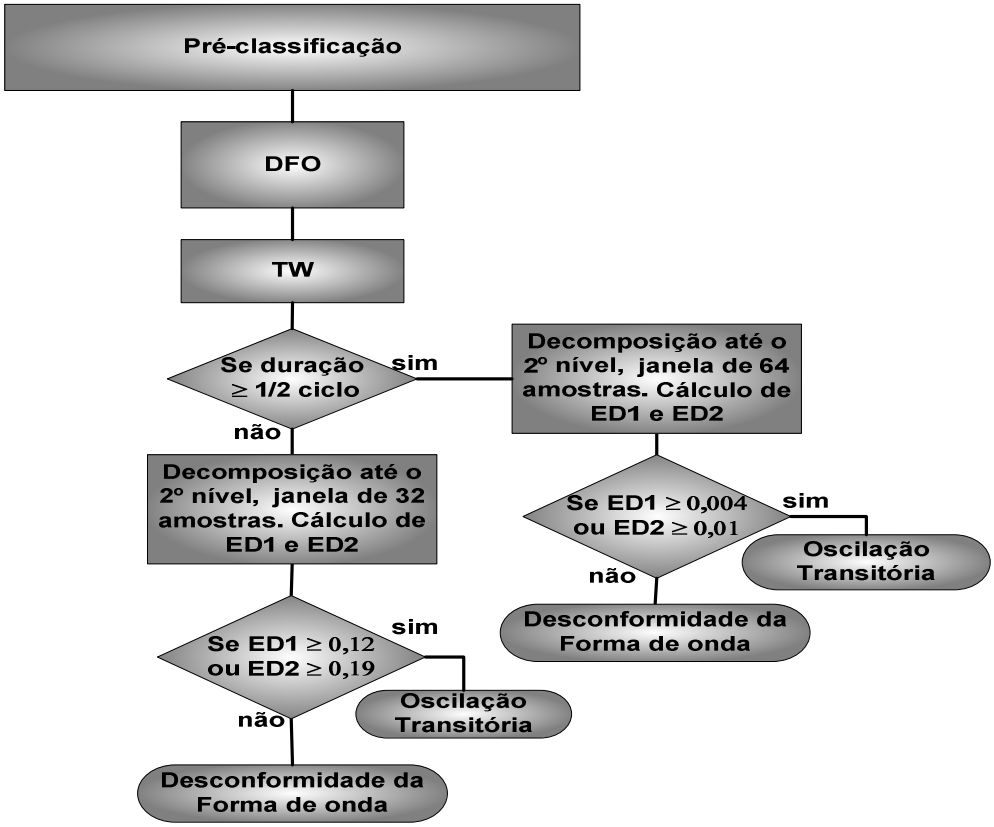


**Figura 26 – Fluxograma para a classificação das ocorrências dispondo da TW para os pré-classificados como DFO.**

A primeira é para os eventos que possuem duração maior que ¼ de ciclo e menor que ½ ciclo. Nesta situação, toma-se uma janela de ¼ de ciclo, decompõe-se a mesma e se verifica se as energias do primeiro (ED1) e segundo detalhe (ED2) ultrapassaram os limiares estabelecidos. Caso afirmativo, o evento é classificado como oscilação transitória. Caso contrário, como desconformidade na forma de onda. Neste caso, os limiares estabelecidos são de ED1 = 0,12 e ED2 = 0,19. Para os eventos com duração maior do que ½ ciclo, dispõe-se de uma ja-

nela de ½ ciclo e se procede da mesma forma. Diferenciando-se apenas nos limiares, que para esta situação são de ED1 = 0,004 e ED2 = 0,01.

Para os casos de VTLD, a única diferença destes para os casos VTCD's apresentados, é que para os casos de interrupção sustentada, a energia do quinto nível de aproximação é igual a zero (EA5 = 0). Isto pode ser verificado, comparando-se o fluxograma da Figura 27 com o fluxograma da Figura 25.

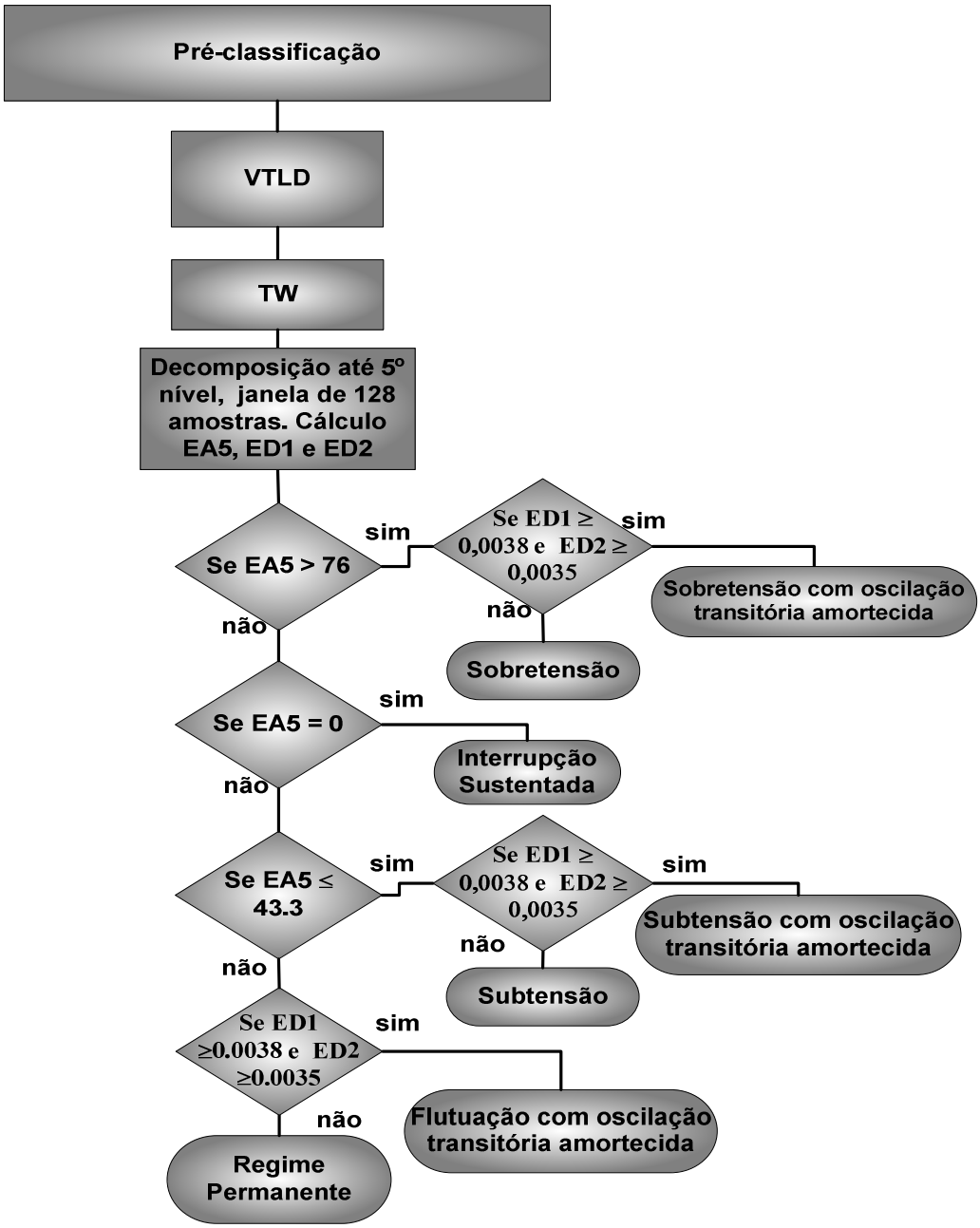


**Figura 27 – Fluxograma para a classificação das ocorrências dispondo da TW para os pré-classificados como VTLD.**

### 4.1.6 Módulo de Decisão lógica

Após a classificação individual realizada por cada uma das ferramentas citadas anteriormente, faz-se necessário obter uma única resposta. Para isto, elaborou-se um conjunto de regras que contempla todas as possíveis situações com relação às respostas obtidas pelas três ferramentas empregadas. Este conjunto de regras é descrito no fluxograma apresentado na Figura 28.

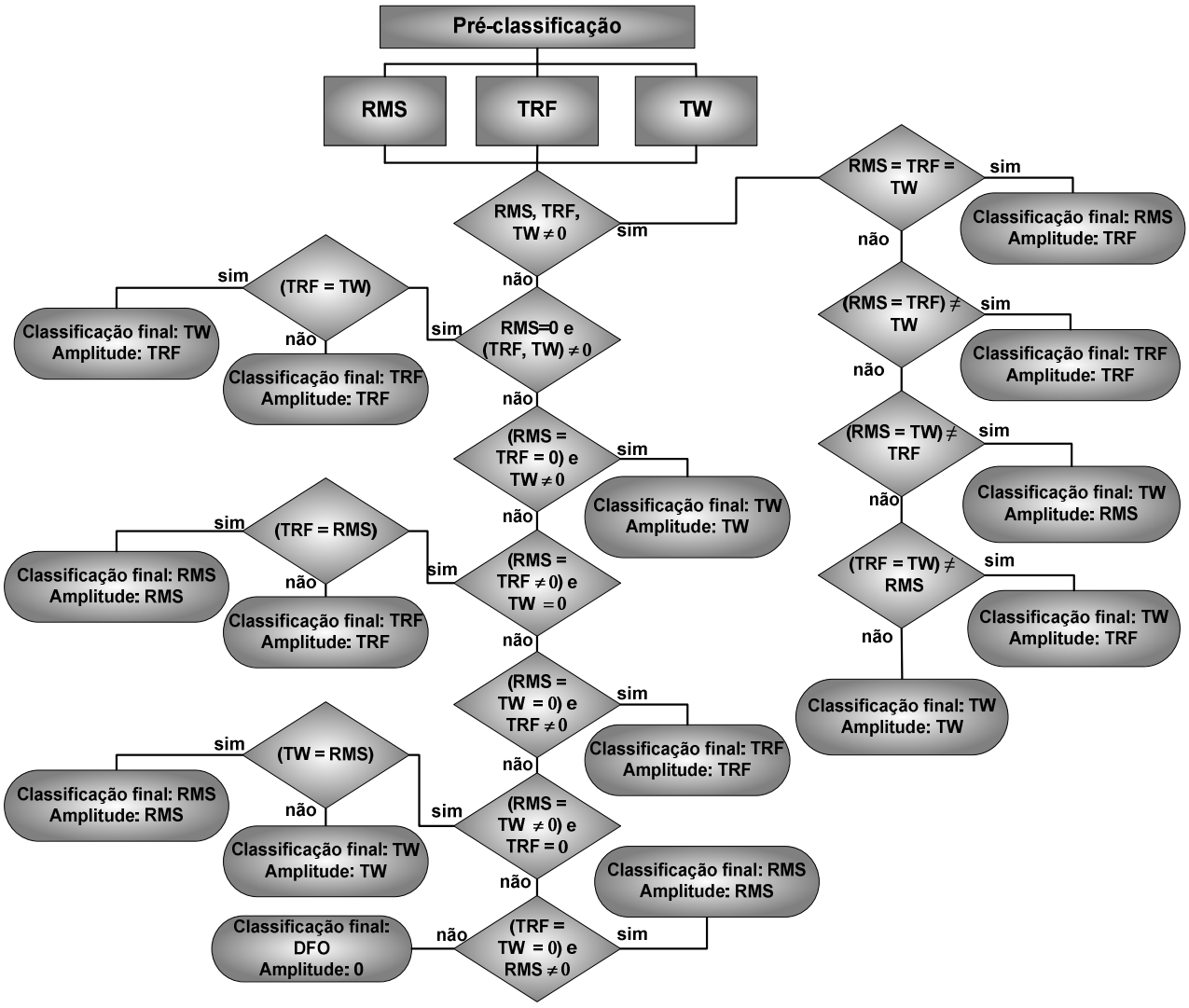


**Figura 28 – Fluxograma para o módulo de decisão lógico**

Cabe frisar que neste módulo sempre serão verificadas as respostas das três ferramentas utilizadas para a classificação e que as respostas compiladas dependerão exclusivamente

da duração dos eventos. Isto implica no fato de que para determinadas situações, algumas das ferramentas poderão não apresentar resposta em função dos limites intrínsecos ao tamanho da janela de dados em análise. Conforme apresentado anteriormente, para os casos com duração entre ¼ e ½ ciclo, somente a TW irá apresentar uma resposta. Já para os casos com duração inferior a um ciclo o valor RMS não apresentará uma resposta e, para os casos com duração inferior a ¼ de ciclo, nenhuma das três ferramentas disponibilizadas apresentará uma resposta para o evento.

Assim, a escolha da ferramenta para a classificação final será realizada de acordo com as respostas apresentadas. Pelo fluxograma apresentado, tem-se uma única resposta quando as três ferramentas apresentarem individualmente uma resposta, quando somente duas ou quando somente uma for capaz de apresentar a resposta. Para cada uma destas situações existe uma tomada de decisão.

Vale frisar que toda a lógica de decisão implementada é baseada no tamanho da janela de dados (duração do fenômeno) em análise, e que, deste tamanho, as limitações usuais à cada ferramenta foram consideradas.

Quanto à amplitude do evento, conforme dito anteriormente, todos os módulos calculam o mesmo. Desta maneira, quando da escolha da ferramenta para a classificação final, determina-se também de qual ferramenta será utilizada a resposta para a amplitude.

Para melhor exemplificar o funcionamento deste módulo, será inicialmente comentado quando da ocorrência de eventos com duração superior a um ciclo.

Para estes eventos, as três ferramentas apresentarão uma resposta. Por exemplo, quando as três respostas forem idênticas, tem-se que a classificação final pode ser dada por qualquer uma das ferramentas. Neste caso a resposta será dada pelo valor RMS. Vale ressaltar que a escolha da ferramenta neste caso, não é de grande relevância, já que, as três apresentaram a mesma resposta. Contudo, quando desta condição, foi direcionado o cálculo da amplitude pela

resposta apresentada pela TRF, já que a mesma é reconhecidamente aceita para janelas de dados comportando um ciclo do sinal em análise.

Conforme apresentado no fluxograma, a TRF somente não foi utilizada para calcular a amplitude dos eventos, quando da impossibilidade desta em apresentar uma resposta. Já o valor RMS é utilizado quando se tem a resposta deste com a da TW. A TW será somente utilizada para o cálculo da amplitude quando somente esta for capaz de apresentar uma resposta.

### 4.1.7 Relatório Técnico

O módulo do relatório técnico foi formatado de maneira a deixar atraente ao usuário final quanto à aplicação do algoritmo proposto, bem como no sentido de evidenciar todos os aspectos conclusivos da análise efetuada. A Figura 29 ilustra como são apresentadas as informações ao usuário.

Dentre as informações disponíveis ao usuário, tem-se:

- Nome do arquivo analisado;
- Nível de tensão analisado em regime permanente;
- Fase analisada;
- A quantidade de eventos ocorridos;
- Classificação individual de cada evento, contendo:
    - Início e fim do evento;
    - Duração do evento;
    - Pré-classificação e classificação, e
    - Amplitude

Estes valores podem ser observados pela Figura 29 impressos diretamente da tela do software *Matlab*®.

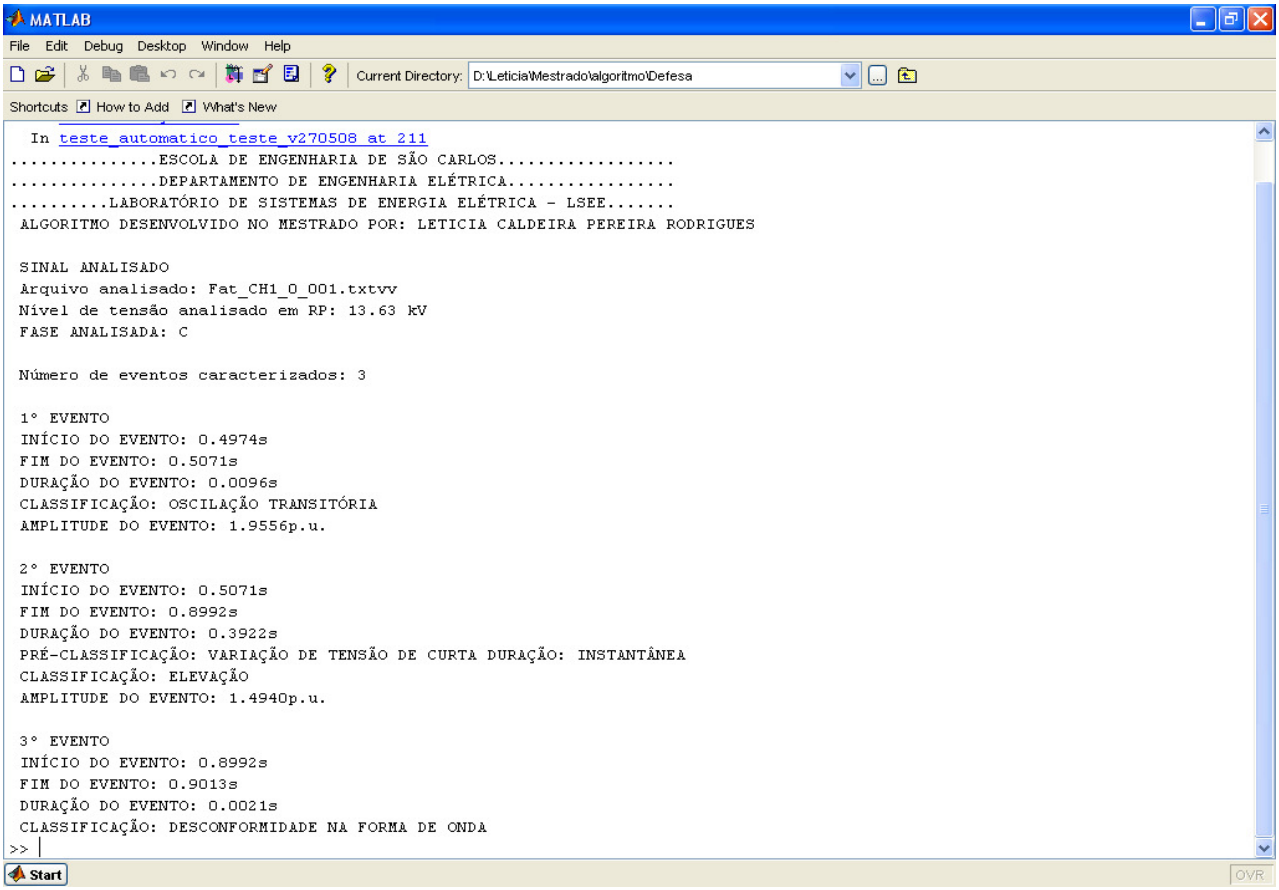


**Figura 29 – Exemplo de relatório de texto gerado quando da aplicação por completa do algoritmo proposto.**

# 5. SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

Com o objetivo de estudar os fenômenos relacionados à QEE, neste capítulo, é apresentado um sistema elétrico real de distribuição conforme encontrado em uma concessionária regional, simulado dispondo do *software* ATP (*Alternative Transients Program*) [61]. Cabe frisar que a modelagem deste sistema de distribuição apresenta grande semelhança com o sistema encontrado na prática, aproximando-se ao máximo das situações em campo. O sistema de distribuição real é representado pelo diagrama da Figura 30 [45].

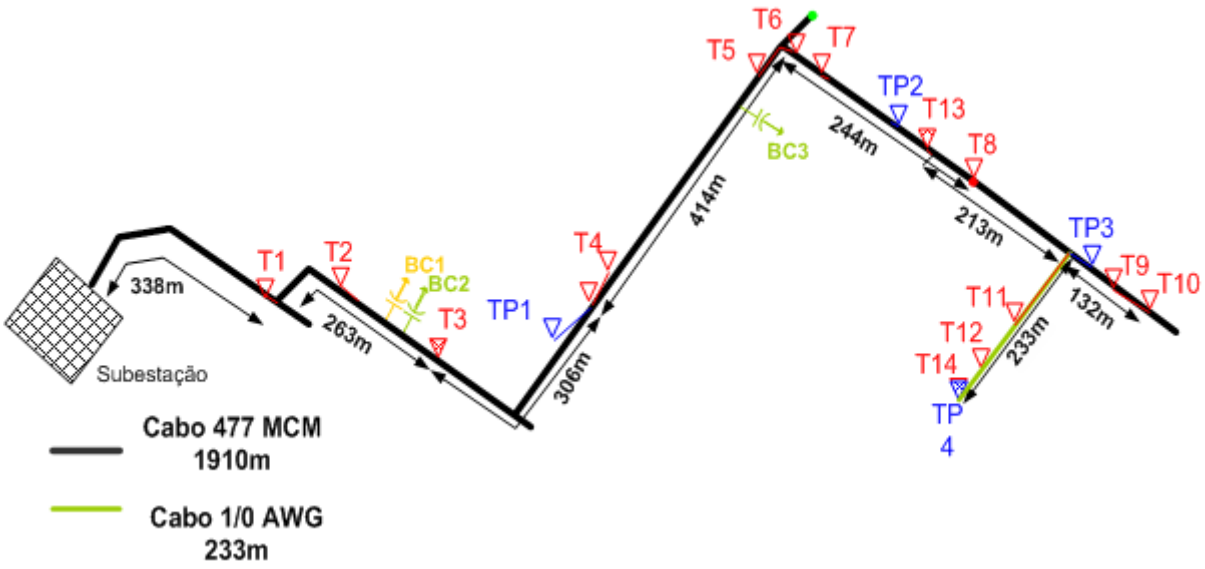


**Figura 30 – Diagrama do sistema elétrico de distribuição real analisado.**

Na Figura 31 tem-se a representação deste mesmo sistema modelado no *software* ATP, dispondo da interface ATPDraw 5.0 [62]. No apêndice A é ilustrado a simbologia utili-

zada quando da aplicação do ATPDraw para o diagrama apresentado na Figura 31. No apêndice B, para propiciar meios de réplica ao sistema analisado, apresentam-se partes do arquivo que descreverá ao *software* ATP as condições operacionais do sistema simulado.

Para o sistema modelado, vale comentar que a subestação é alimentada no nível de transmissão á 138 kV, sendo que o transformador da subestação (TSUB) rebaixa este valor para o nível de tensão de distribuição de 13,8kV. A potência deste transformador é de 25MVA.

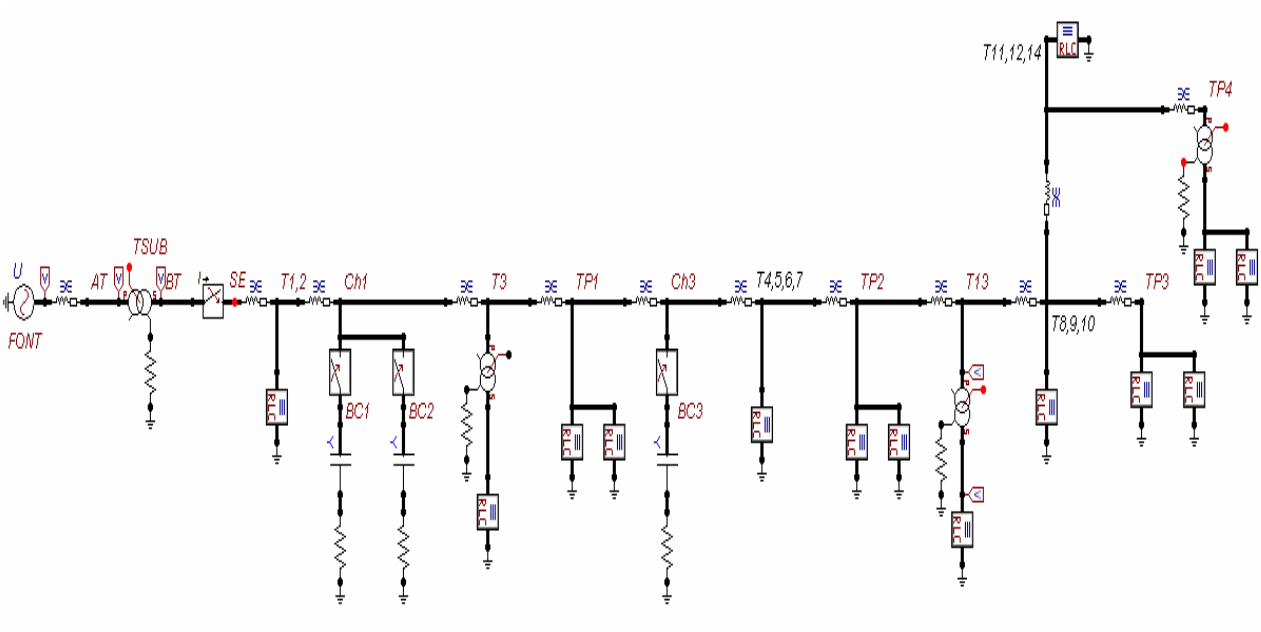


**Figura 31 – Representação do sistema elétrico de distribuição real pelo software ATPDraw 5.0.**

Neste sistema, os transformadores de distribuição 3 (T3) e 13 (T13), o transformador particular 4 (TP4) e o TSUB foram modelados por completo, levando em consideração as suas curvas de saturação. Os transformadores particulares 1 (TP1), 2 (TP2) e 3 (TP3) foram modelados sem considerar as suas curvas de saturação. As cargas foram referidas ao primário como uma parcela RL em paralelo com um capacitor (C), para a correção do fator de potência. Para a determinação deste capacitor, as cargas foram consideradas com fator de potência original de 0,75, sendo posteriormente, aplicada uma correção para 0,92. Na Tabela 2, tem-se a descrição das características dos transformadores particulares.

Os demais transformadores de distribuição foram modelados levando em consideração somente o seu ponto de conexão no sistema, utilizando um fator de potência geral de 0,95 para definição da carga RL referida ao primário.

**Tabela 2 – Dados dos transformadores particulares.**

| *Transformadores particulares* | *Carga Nominal (kVA) / número de unidade* | *Carga Incidente (kVA)* |
|---|---|---|
| 1 | 2250/03 | 2500 |
| 2 | 3000/04 | 1600 |
| 3 | 450/02 | 456 |
| 4 | 300/01 | 280 |

Em alguns casos, os transformadores foram agrupados em um único ponto no sistema. Na Figura 31 tem-se uma representação das cargas equivalentes destes transformadores neste ponto. Os dados dos transformadores de distribuição estão descritos na Tabela 3.

**Tabela 3 – Dados dos transformadores de distribuição.**

| *Transformadores de distribuição* | *Carga Nominal (kVA)* | *Carga Incidente (kVA)* |
|---|---|---|
| 1 | 75 | 40 |
| 2 | 75 | 31 |
| 3 | 45 | 32 |
| 4 | 45 | 22 |
| 5 | 112,5 | 19 |
| 6 | 225 | 89 |
| 7 | 150 | 27 |
| 8 | 150 | 29 |
| 9 | 45 | 9 |
| 10 | 225 | 19 |
| 11 | 30 | 26 |
| 12 | 150 | 86 |
| 13 | 75 | 19 |
| 14 | 75 | 7 |

Deve ser ressaltado que todos os transformadores de distribuição e transformadores particulares possuem ligação delta-estrela aterrado, com resistência de aterramento igual a zero ohm, sendo o *tap* ajustado em 13.200/220 volts.

Ao longo deste sistema, três bancos de capacitores (BC1, BC2 e BC3) estão instalados no ponto Ch1 e Ch3, conforme ilustra a Figura 31. BC1 é um banco de capacitor fixo, com potência de 1200 kVAr, a uma distância de 476m da subestação. Os outros dois bancos de capacitores, BC2 e BC3, possuem a potência de 600 kVAr cada e estão localizados, respectivamente, a uma distância de 476m e 1176m da subestação, no ponto Ch1 e Ch3, como indicado na Figura 31. Em campo, estes dois últimos bancos de capacitores não existem. Estes foram inseridos neste sistema para que se pudesse simular o chaveamento automático de bancos de capacitores e, com isto, gerar situações transitórias. Cabe comentar que se a operação automática fosse desejada, o banco de 1200 KVAr permaneceria inativo, enquanto que, chaveava-se primeiramente o BC2 e posteriormente, o BC3.

O alimentador principal é constituído de cabo nu, CA-477 MCM, em estrutura aérea tradicional, com a extensão de 1910m. Este sistema possui um alimentador em derivação, cujo cabo utilizado é o 1/0 AWG, com extensão de 233m. Neste alimentador estão conectados os transformadores de distribuição T11, T12, T14 e o transformador particular TP4.

## 5.1 Situações de faltas simuladas sobre um primeiro e distinto alimentador de um sistema de distribuição real

Sobre o sistema apresentado, inicialmente, foram simuladas situações de distúrbios de curta duração. Os distúrbios simulados foram: interrupção, afundamento e elevação de tensão. Para cada situação caracterizada, considerou-se uma freqüência de amostragem de 7,68 kHz.

Foram aplicadas faltas do tipo fase-terra sobre o sistema em quatro diferentes pontos indicados na Figura 31. São estes: SE, CH1, T13 e TP1, considerando uma variação do ângulo de incidência da falta (0 e 90º), da resistência de falta (entre 0,01 e 5 ohms) e o tempo de duração do fenômeno (momentâneo e temporário).

Cabe frisar que as medições foram realizadas na subestação e, para os casos de falta aplicada no transformador T13, estas foram realizadas também no ponto da falta.

A Tabela 4 apresenta as situações de interrupção de tensão obtidas para os casos de falta no lado de baixa do transformador da subestação, representado na Figura 31 pelo ponto SE. Dados como o ângulo de incidência da falta, a resistência de falta e o valor da tensão remanescente são apresentados nesta tabela.

**Tabela 4 – Interrupções de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra no lado de baixa do transformador na subestação.**

| *Situação* | *Resistência de falta (Ohms)* | *Ângulo de incidência (º)* | *Tensão remanescente (pu)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,01 | 0 e 90 | 0,0080 |
| 2 | 0,02 | 0 e 90 | 0,0158 |
| 3 | 0,03 | 0 e 90 | 0,0236 |
| 4 | 0,04 | 0 e 90 | 0,0312 |
| 5 | 0,05 | 0 e 90 | 0,0388 |
| 6 | 0,06 | 0 e 90 | 0,0462 |
| 7 | 0,07 | 0 e 90 | 0,0536 |
| 8 | 0,08 | 0 e 90 | 0,0609 |
| 9 | 0,09 | 0 e 90 | 0,0681 |
| 10 | 0,1 | 0 e 90 | 0,0752 |

Os resultados obtidos pelas faltas aplicadas na alta do transformador de distribuição T13 são apresentados na Tabela 5. Sendo a leitura realizada também neste transformador.

**Tabela 5 – Interrupções de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra na alta do transformador T13**

| *Situações* | *Resistência de falta (Ohms)* | *Ângulo de incidência (º)* | *Tensão remanescente (pu)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,01 | 0 e 90 | 0,0040 |
| 2 | 0,03 | 0 e 90 | 0,0120 |
| 3 | 0,07 | 0 e 90 | 0,0277 |

Como pode ser observado nas Tabelas 4 e 5, para se obter as situações de interrupção de tensão, foi necessária a utilização de resistência de falta com baixa impedância, as quais podem vir a caracterizar faltas temporárias.

A Tabela 6 apresenta os resultados dos afundamentos de tensão oriundos de faltas aplicadas no secundário do transformador da subestação, variando-se a resistência de falta entre 0,2 e 5 ohms. Somando-se a estes casos, foram também simuladas faltas com resistências de falta menores que 0,2 ohms. Para estes casos, a tensão remanescente foi menor que 0,1 p.u., caracterizando então interrupções no fornecimento da energia.

**Tabela 6 – Afundamentos de tensão obtidos através da aplicação de falta fase-terra no secundário do transformador da subestação.**

| *Situações* | *Resistência de falta (Ohms)* | *Ângulo de incidência (º)* | *Tensão remanescente (pu)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,2 | 0 e 90 | 0,1417 |
| 2 | 0,3 | 0 e 90 | 0,2007 |
| 3 | 0,5 | 0 e 90 | 0,2996 |
| 4 | 0,7 | 0 e 90 | 0,3790 |
| 5 | 0,9 | 0 e 90 | 0,4434 |
| 6 | 1 | 0 e 90 | 0,4713 |
| 7 | 2 | 0 e 90 | 0,6508 |
| 8 | 3 | 0 e 90 | 0,7410 |
| 9 | 5 | 0 e 90 | 0,8301 |

Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos quando da aplicação de faltas na alta do transformador de distribuição T13. Os resultados foram registrados na subestação. A

resistência de falta variou entre 0,01 e 5 ohms, e a tensão remanescente permaneceu entre 0,51 e 0,93 p.u..

**Tabela 7 – Afundamentos de tensão obtidos através da aplicação de falta fase-terra no lado de alta do transformador T13, sendo a leitura dos dados efetuada na subestação.**

| *Situações* | *Resistência de falta (Ohms)* | *Ângulo de incidência (º)* | *Tensão remanescente (pu)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,01 | 0 e 90 | 0,5323 |
| 2 | 0,03 | 0 e 90 | 0,5354 |
| 3 | 0,07 | 0 e 90 | 0,5399 |
| 4 | 0,3 | 0 e 90 | 0,5635 |
| 5 | 0,7 | 0 e 90 | 0,6110 |
| 6 | 1 | 0 e 90 | 0,6426 |
| 7 | 2 | 0 e 90 | 0,7263 |
| 8 | 3 | 0 e 90 | 0,7824 |
| 9 | 5 | 0 e 90 | 0,8488 |

Os resultados das faltas aplicadas no ponto Ch1 são apresentados na Tabela 8. Neste ponto de aplicação de falta, não foram obtidos os valores de afundamentos de 0,1 e 0,9 p.u., sendo possível caracterizar tensões remanescentes entre 0,29 e 0,83 p.u..

**Tabela 8 – Afundamentos de tensão obtidos através da aplicação de falta fase-terra no ponto Ch1.**

| *Situações* | *Resistência de falta (Ohms)* | *Ângulo de incidência (º)* | *Tensão remanescente (pu)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,01 | 0 e 90 | 0,3049 |
| 2 | 0,03 | 0 e 90 | 0,3111 |
| 3 | 0,07 | 0 e 90 | 0,3230 |
| 4 | 0,1 | 0 e 90 | 0,3331 |
| 5 | 0,3 | 0 e 90 | 0,3924 |
| 6 | 0,7 | 0 e 90 | 0,4968 |
| 7 | 1 | 0 e 90 | 0,5554 |
| 8 | 2 | 0 e 90 | 0,6870 |
| 9 | 3 | 0 e 90 | 0,7610 |
| 10 | 5 | 0 e 90 | 0,8409 |

Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos para o mesmo local de aplicação da falta, mas com leitura dos dados na alta do transformador T13. Comparando a Tabela 7

com a Tabela 9, vemos que devido ao registro dos dados ser realizado no ponto de aplicação da falta, tem-se que para os valores de resistência de falta menor que 0,3 ohms, a tensão remanescente obtida foi menor que 0,1 p.u., gerando assim situações de interrupção de tensão. Para estes mesmos valores, mas com o registro na subestação, foram obtidas situações de afundamento. Isto é devido ao próprio sistema amortecer os efeitos da falta devido à distância de aproximadamente 1565 m, entre o ponto da falta (T13) ao ponto de aquisição e registro dos dados na subestação (SUB).

**Tabela 9 – Afundamentos de tensão obtidos através da aplicação de falta fase-terra no lado de alta do transformador T13 e leitura dos dados no mesmo.**

| *Situações* | *Resistência de falta (Ohms)* | *Ângulo de incidência (º)* | *Tensão remanescente (pu)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,3 | 0 e 90 | 0,1111 |
| 2 | 0,7 | 0 e 90 | 0,2320 |
| 3 | 1 | 0 e 90 | 0,3061 |
| 4 | 2 | 0 e 90 | 0,4822 |
| 5 | 3 | 0 e 90 | 0,5915 |
| 6 | 5 | 0 e 90 | 0,7159 |

Para o quarto ponto de aplicação de falta, TP1, temos os resultados obtidos demonstrados na Tabela 10. Nesta tabela são apresentados os valores das resistências de falta, dos ângulos de incidência da falta utilizados para se obter os afundamentos de tensão, e na última coluna, o valor obtido da tensão remanescente.

Por último, temos os casos de elevação de tensão. Salientando que as simulações dos distúrbios foram realizadas com a aplicação da falta na fase “A” de um sistema trifásico, sendo os casos de elevação obtidos na fase “C” deste mesmo sistema.

**Tabela 10 – Afundamentos de tensão obtidos através da aplicação de falta fase-terra no ponto TP1.**

| *Situações* | *Resistência de falta* | *Ângulo de incidência (º)* | *Tensão remanescente* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,01 | 0 e 90 | 0,4197 |
| 2 | 0,03 | 0 e 90 | 0,4242 |
| 3 | 0,07 | 0 e 90 | 0,4328 |
| 4 | 0,1 | 0 e 90 | 0,4396 |
| 5 | 0,3 | 0 e 90 | 0,4818 |
| 6 | 0,7 | 0 e 90 | 0,5589 |
| 7 | 1 | 0 e 90 | 0,6043 |
| 8 | 2 | 0 e 90 | 0,7114 |
| 9 | 3 | 0 e 90 | 0,7754 |
| 10 | 5 | 0 e 90 | 0,8480 |

Na Tabela 11 são exibidos os resultados obtidos das simulações de falta no ponto T13. Nesta tabela, as leituras dos resultados apresentados, foram feitas na subestação. Os valores das resistências de falta variaram entre 0,01 e 5 ohms. Para o caso em que a resistência de falta é de 5 ohms, a tensão remanescente foi de 1,0956 p.u., não caracterizando, por definição, uma elevação de tensão.

**Tabela 11 – Elevações de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra no lado de alta do transformador T13 e leitura dos dados na subestação.**

| *Situações* | *Resistência de falta (Ohms)* | *Ângulo de incidência (º)* | *Tensão remanescente (pu)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,01 | 0 e 90 | 1,3424 |
| 2 | 0,03 | 0 e 90 | 1,3405 |
| 3 | 0,07 | 0 e 90 | 1,3360 |
| 4 | 0,3 | 0 e 90 | 1,3104 |
| 5 | 0,7 | 0 e 90 | 1,2728 |
| 6 | 1 | 0 e 90 | 1,2461 |
| 7 | 2 | 0 e 90 | 1,1825 |
| 8 | 3 | 0 e 90 | 1,1415 |

Para as faltas aplicadas na alta do transformador T13 e leitura de dados no mesmo ponto, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12 – Elevações de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra no lado de alta do transformador T13 e leitura dos dados no local.**

| *Situações* | *Resistência de falta* | *Ângulo de incidência (º)* | *Tensão remanescente (pu)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,01 | 0 e 90 | 1,4112 |
| 2 | 0,03 | 0 e 90 | 1,4085 |
| 3 | 0,07 | 0 e 90 | 1,4014 |
| 4 | 0,3 | 0 e 90 | 1,3630 |
| 5 | 0,7 | 0 e 90 | 1,3055 |
| 6 | 1 | 0 e 90 | 1,2696 |
| 7 | 2 | 0 e 90 | 1,1845 |
| 8 | 3 | 0 e 90 | 1,1334 |

Assim como nas outras tabelas, a Tabela 13 mostra os resultados da aplicação da falta no ponto Ch1, com o ângulo de incidência de 0 e 90º e resistência de falta variando entre 0,01 e 3 ohms. A leitura dos dados foi realizada na subestação.

**Tabela 13 – Elevações de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra no ponto Ch1**

| *Situações* | *Resistência de falta (Ohms)* | *Ângulo de incidência (º)* | *Tensão remanescente (pu)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,01 | 0 e 90 | 1,4964 |
| 2 | 0,03 | 0 e 90 | 1,4912 |
| 3 | 0,07 | 0 e 90 | 1,4807 |
| 4 | 0,1 | 0 e 90 | 1,4733 |
| 5 | 0,3 | 0 e 90 | 1,4258 |
| 6 | 0,7 | 0 e 90 | 1,3479 |
| 7 | 1 | 0 e 90 | 1,3043 |
| 8 | 2 | 0 e 90 | 1,2067 |
| 9 | 3 | 0 e 90 | 1,1528 |

Na Tabela 14 são apresentados os resultados da elevação de tensão obtidos pela aplicação da falta no secundário do transformador da subestação. Assim como nos outros casos, os ângulos de incidência da falta variaram entre 0 e 90º. Fora a variação do ângulo de incidência da falta, tem-se também a variação da duração dos distúrbios em momentâneo e temporá-

rio e as resistências de falta entre 0,01 e 5 ohms, para a obtenção das elevações de tensão apresentados na 4ª coluna desta tabela. Para esta situação, devido a falta ser no lado de baixa tensão do transformador, tem-se as maiores amplitudes, mesmo para as situações caracterizadas por altas impedâncias de falta.

**Tabela 14 – Elevações de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra no secundário do transformador da subestação**

| *Situações* | *Resistência de falta* | *Ângulo de incidência (º)* | *Tensão remanescente (pu)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,01 | 0 e 90 | 1,7045 |
| 2 | 0,02 | 0 e 90 | 1,6995 |
| 3 | 0,03 | 0 e 90 | 1,6945 |
| 4 | 0,04 | 0 e 90 | 1,6896 |
| 5 | 0,05 | 0 e 90 | 1,6847 |
| 6 | 0,06 | 0 e 90 | 1,6798 |
| 7 | 0,07 | 0 e 90 | 1,6751 |
| 8 | 0,08 | 0 e 90 | 1,6703 |
| 9 | 0,09 | 0 e 90 | 1,6656 |
| 10 | 0,1 | 0 e 90 | 1,6610 |
| 11 | 0,2 | 0 e 90 | 1,6146 |
| 12 | 0,3 | 0 e 90 | 1,5751 |
| 13 | 0,5 | 0 e 90 | 1,5019 |
| 14 | 0,7 | 0 e 90 | 1,4428 |
| 15 | 0,9 | 0 e 90 | 1,3941 |
| 16 | 1 | 0 e 90 | 1,3728 |
| 17 | 2 | 0 e 90 | 1,2333 |
| 18 | 3 | 0 e 90 | 1,1646 |
| 19 | 5 | 0 e 90 | 1,1013 |

Os resultados obtidos quando da aplicação da falta no ponto TP1 são mostrados na Tabela 15. Nesta tabela também é apresentado o valor da resistência de falta, do ângulo de incidência e da tensão residual.

**Tabela 15 – Elevações de tensão obtidas através da aplicação de falta fase-terra no ponto TP1.**

| *Situações* | *Resistência de falta (Ohms)* | *Ângulo de incidência (º)* | *Tensão remanescente (pu)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,01 | 0 e 90 | 1,4118 |
| 2 | 0,03 | 0 e 90 | 1,4081 |
| 3 | 0,07 | 0 e 90 | 1,4001 |
| 4 | 0,1 | 0 e 90 | 1,3942 |
| 5 | 0,3 | 0 e 90 | 1,3609 |
| 6 | 0,7 | 0 e 90 | 1,3047 |
| 7 | 1 | 0 e 90 | 1,2689 |
| 8 | 2 | 0 e 90 | 1,1901 |
| 9 | 3 | 0 e 90 | 1,1435 |

A quantidade total de casos simulados para cada tipo de distúrbio é apresentada na Tabela 16. Nesta tabela é apresentada a quantidade de casos obtidos para cada ponto de aplicação de falta, levando-se em consideração a variação do ângulo de incidência da falta entre 0 e 90º e a variação no tempo de duração do distúrbio em instantâneo, momentâneo e temporário. Na 5ª coluna é apresentada a quantidade total de casos no ponto de aplicação de falta.

**Tabela 16 – Quantidade de casos simulados para VTCD.**

| *Localização da falta* | *Afundamento* | *Elevação* | *Interrupção* | *Total* |
|---|---|---|---|---|
| SE | 54 | 114 | 60 | 228 |
| Ch1 | 60 | 54 | - | 114 |
| T13 | 90 | 96 | 18 | 204 |
| TP1 | 60 | 54 | - | 114 |
| **Total de casos** | | | | **660** |

As simulações e/ou situações de distúrbios de longa duração (com um tempo de duração maior do que 1 minuto) para a caracterização conceitual de VTLD (Variações de Tensão de Longa Duração) foram simuladas sobre este mesmo sistema, mas em uma quantidade me-

nor. Foram simuladas somente dez situações de VTLD. Sendo quatro situações de sobretensão, quatro de subtensão e duas de interrupção sustentada. Nas simulações de sobretensão e subtensão foram consideradas resistências de falta de 2 e 5 ohms, ângulo de inserção de falta de 0 e 90º, e ponto de aplicação da falta no transformador TP1. Com estas situações foi possível obter situações em que as tensões resultantes ficassem dentro dos valores em estudo, neste caso, entre 0,8 e 0,9 p.u. – para os casos de subtensão e entre 1,1 a 1,2 para os casos de sobretensão. Para os casos de interrupção sustentada, foi simulada uma falta fase terra na saída do alimentador principal. Também considerando os ângulos de falta citados anteriormente.

## 5.2 Disponibilização de dados de um segundo e distinto sistema de distribuição real

Para efeitos de validação do algoritmo proposto, tomou-se também o uso de uma modelagem e simulação computacional de um sistema de distribuição real de 23,1kV de uma concessionária regional. Por tal sistema fazer parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento em curso, tomou-se a liberdade de se usufruir de tais simulações sem, no entanto, apresentar maiores detalhes e parâmetros do mesmo.

Vale colocar que as situações em análise foram geradas sobre um dos quatro alimentadores deste sistema, e que todos os trabalhos desenvolvidos, em conjunto com o corpo técnico da USP e da concessionária, dispuseram dos aplicativos do ATPDraw [60], com o objetivo de se modelar o sistema da forma mais real possível. Neste ambiente do ATP, foi realizada a modelagem do alimentador e algumas simulações pertinentes ao estudo de QEE. Foram aplicadas 10 situações de falta fase A-terra, com freqüência amostragem de 7680 Hz, com

ângulos de incidência de falta de 0 e 90º, duração de 700 ms e aplicação em diversos pontos de consumidores deste alimentador.

Os casos simulados de VTCD citados acima, estão representados nas figuras 32 à 42.

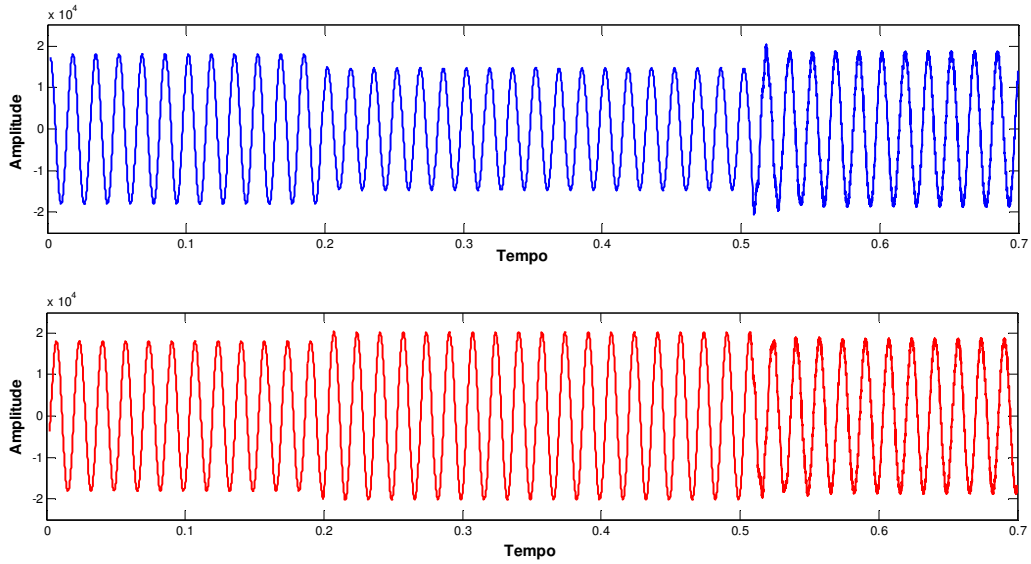


**Figura 32 – Caso 1: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de tensão 0,81 p.u e b) elevação de tensão de 1,11 p.u**

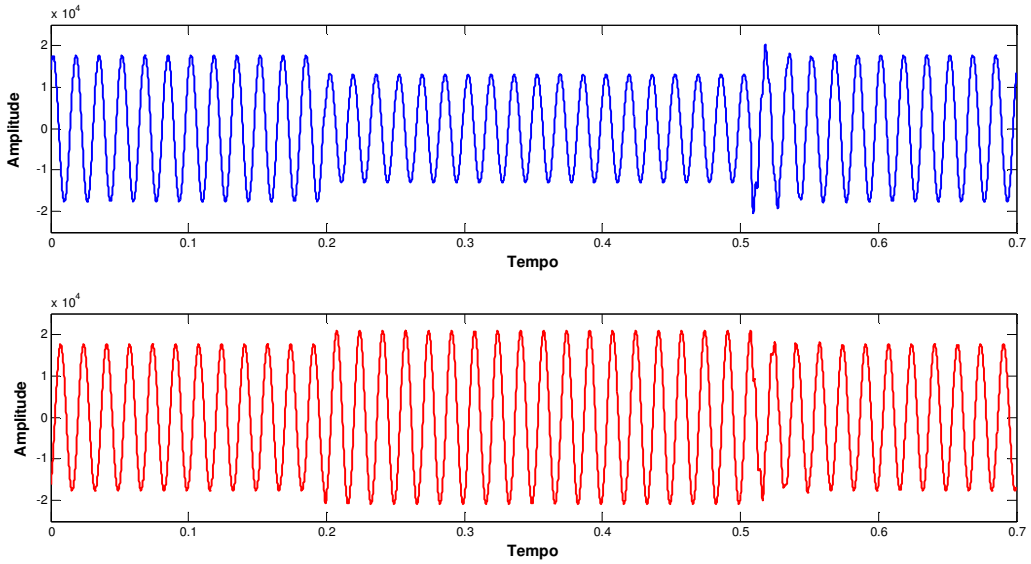


**Figura 33 – Caso 2: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de 0,74 p.u e b) elevação de tensão de 1,18 p.u.**

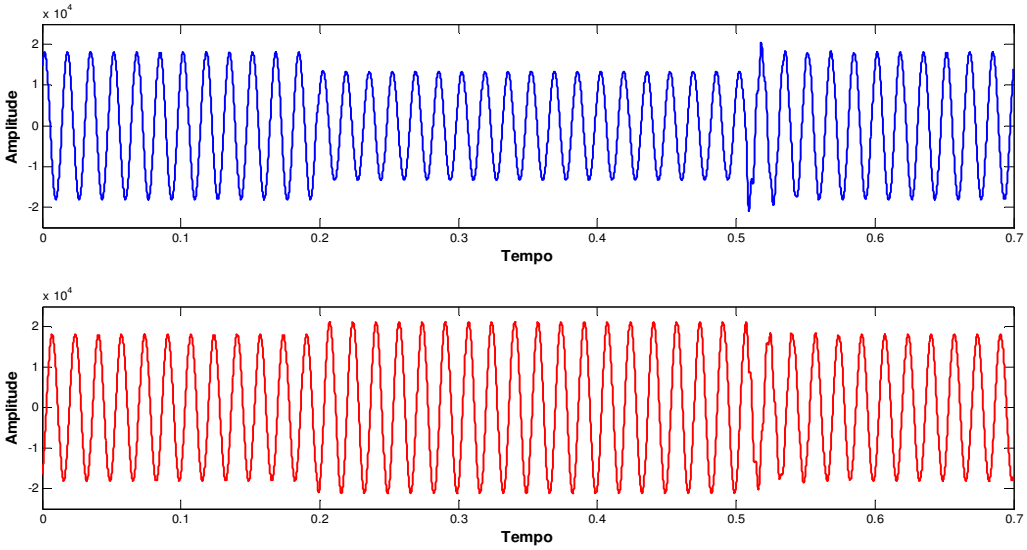


**Figura 34 – Caso 3: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de 0,74 p.u e b) elevação de tensão de 1,17 p.u.**

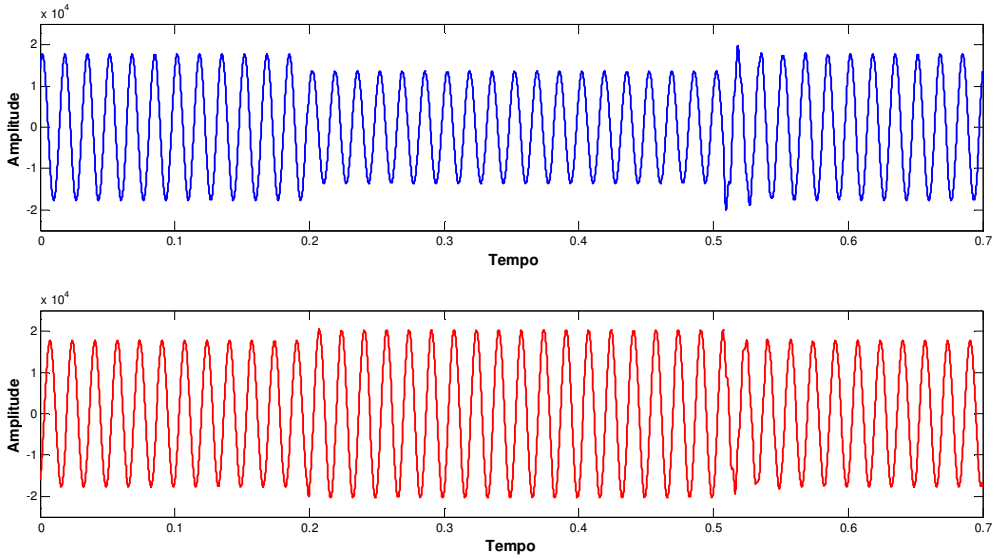


**Figura 35 – Caso 4: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de 0,77 p.u e b) elevação de tensão de 1,15 p.u.**

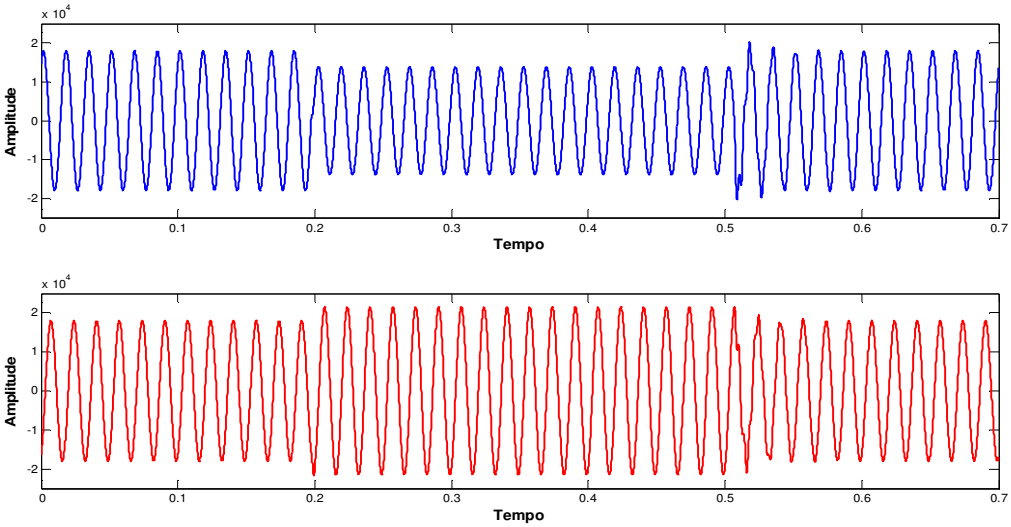


**Figura 36 – Caso 5: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de 0,77 p.u e b) elevação de tensão de 1,19 p.u.**

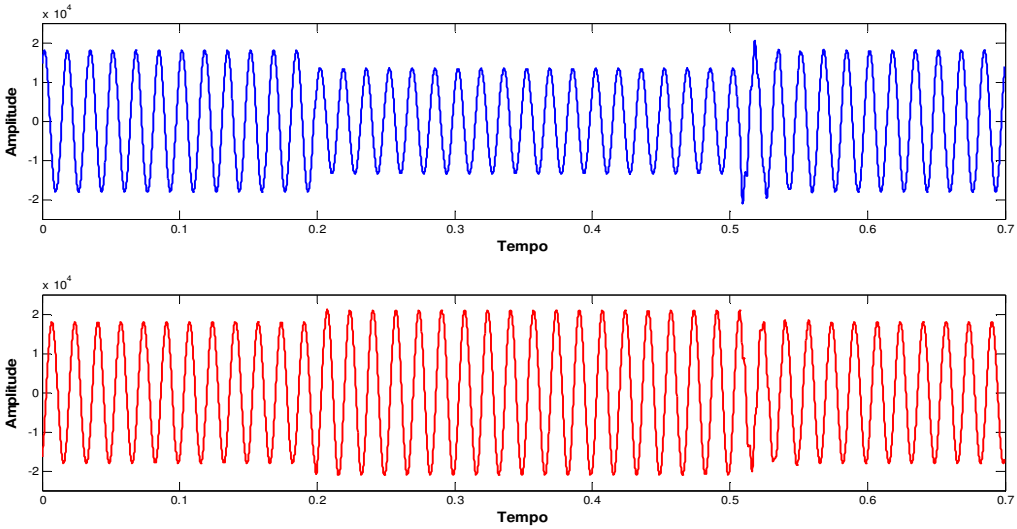


**Figura 37 – Caso 6: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de 0,74 p.u e b) elevação de tensão de 1,17 p.u.**

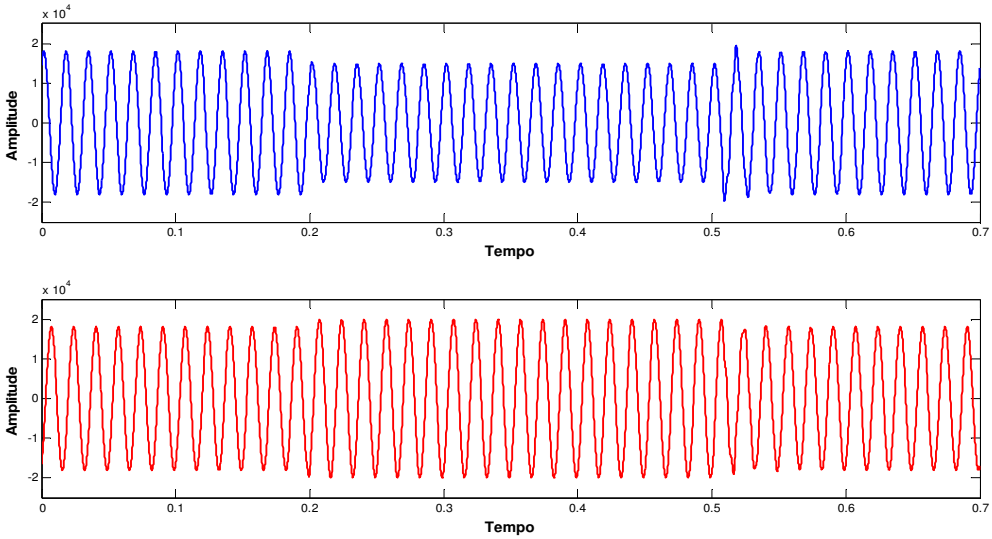


**Figura 38 – Caso 7: falta aplicada com resistência de 17Ω e ângulo de incidência de 0º. a) afundamento de 0,83 p.u e b) elevação de tensão de 1,11 p.u.**

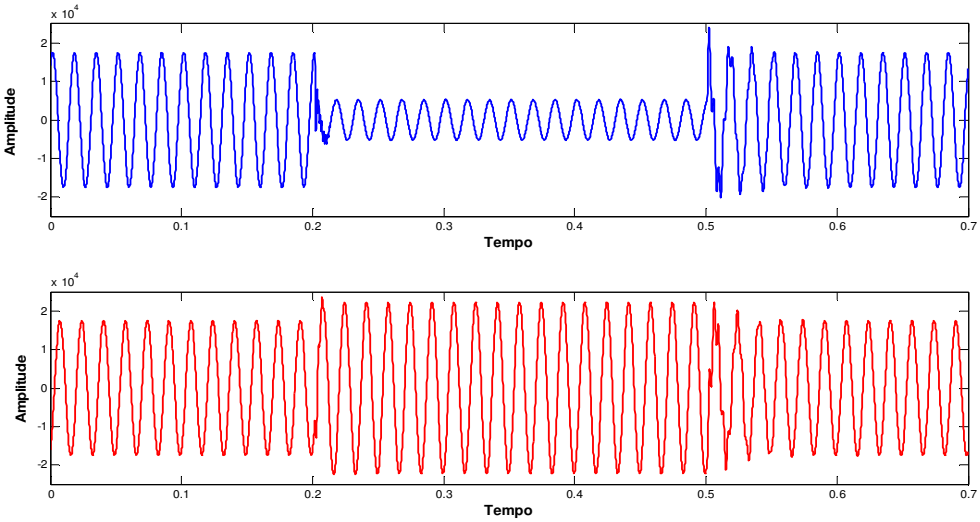


**Figura 39 – Caso 8: falta aplicada com resistência de 0,01 Ω e ângulo de incidência de 90º. a) afundamento de 0,29 p.u e b) elevação de tensão de 1,27 p.u.**

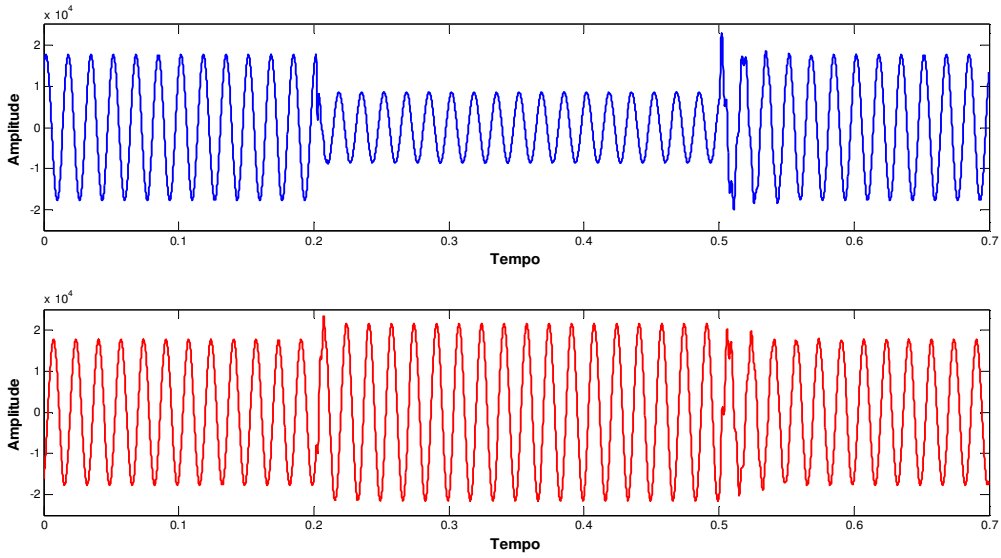


**Figura 40 – Caso 9: falta aplicada com resistência de 0,01Ω e ângulo de incidência de 90º. a) afundamento de 0,49 p.u e b) elevação de tensão de 1,21 p.u.**

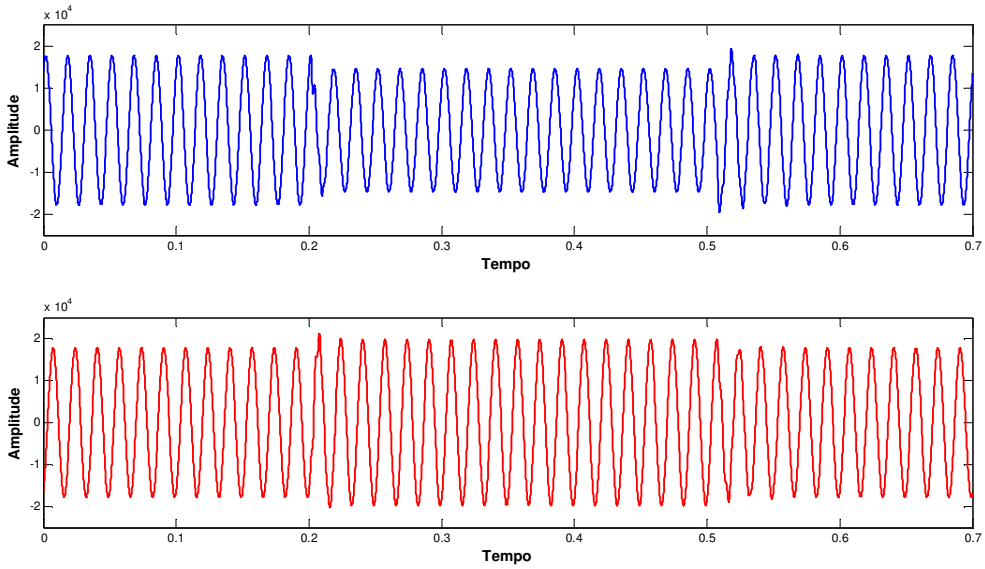


**Figura 41 – Caso 10: falta aplicada com resistência de 0,01Ω e ângulo de incidência de 90º. a) afundamento de 0,71 p.u e b) elevação de tensão de 1,13 p.u.**

# 6. TESTES E RESULTADOS OBSERVADOS

Nesta etapa serão apresentados, seguindo a metodologia evidenciada no capitulo 4, os resultados obtidos através da detecção, localização no tempo e classificação das alterações manifestadas na forma de onda dos sinais em análise.

Da duração destes fenômenos sobre o sistema elétrico, têm-se as situações de variações de tensão de curta duração (VTCD), variações de tensão de longa duração (VTLD) e desconformidade na forma de onda (DFO).

Relembra-se que no capítulo 5 foram apresentados 660 distintos casos correspondestes à VTCD e 10 à VTLD, que foram obtidos via simulação computacional sobre o sistema elétrico de distribuição caracterizado. Dentre este número, têm-se situações onde a única diferença das demais, é o tempo de duração, já que estas caracterizavam ocorrências instantâneas, momentâneas e/ou temporárias. Diante do exposto, será utilizado para o conjunto de teste, um número inferior de casos. Serão utilizadas 171 situações de VTCD. Destas, 61 dizem respeito a afundamentos de tensão de 0,1 a 0,9 p.u., 28 de interrupções de energia e 82 de elevações de tensão variando de 1,1 a 1,8 p.u. Para os casos de VTLD, serão utilizados todos os casos simulados, ou seja, 10 casos, sendo 2 são de interrupção sustentada, 4 de subtensões caracterizada entre 0,8 a 0,9 p.u., e 4 de sobretensões entre 1,1 e 1,2 pu. Como já apresentado, os fenômenos foram caracterizados tomando-se como base os ângulos de 0 e 90º.

Além destas 171 distintas situações, conforme colocado no item 5.2, tem-se 20 novas situações obtidas sobre um sistema de distribuição alheio ao inicial. Destas 20 situações, 10 se referem a afundamentos e 10 a elevações de tensão de curta duração. Todas também serão avaliadas pela lógica implementada e os resultados decorrentes serão devidamente reportados.

## 6.1 Detecção e localização das alterações da forma de onda no sinal

Como já apresentado, o algoritmo é inicializado pela escolha do arquivo que contem os registros das situações desejadas à análise.

Cabe relembrar que todas as situações consideradas foram geradas dispondo do *software* ATP via a interface gráfica do software *ATPDraw*, sobre os sistemas de distribuição apresentados no Capítulo 5. Pela lógica implementada, cada fase das tensões trifásicas poderá ser analisada de forma independente.

Quando da escolha do arquivo a ser analisado (decorrente de simulações ou de dados oscilografados) e da fase da tensão desejada, uma janela de um ciclo, com 128 amostras, irá se deslocar com um passo de avanço de ¼ de ciclo sobre o sinal desejado. A TW será aplicada no seu primeiro nível de decomposição a cada janela de dados apresentada.

Ressalta-se que para a etapa de detecção do início das alterações, para um mesmo tipo de distúrbio, não houve uma variação significativa dos tempos, quando da inserção dos fenômenos a 0 ou 90º. Tal afirmação está ilustrada pelas Figuras 42 e 43, que apresentam os instantes iniciais (referência e obtido) para os casos de elevação de tensão, considerando os ângulos de inserção mencionados. Por estas figuras, observa-se que a maior variação entre o valor de referência e o valor obtido foi de 0,8 ms para os casos com ângulo de inserção a 0º. Este valor conforme apresentado indica uma diferença de oito amostras. Para os casos com

ângulo de inserção à 90º, o valor obtido foi igual ao valor esperado para todas as situações avaliadas.

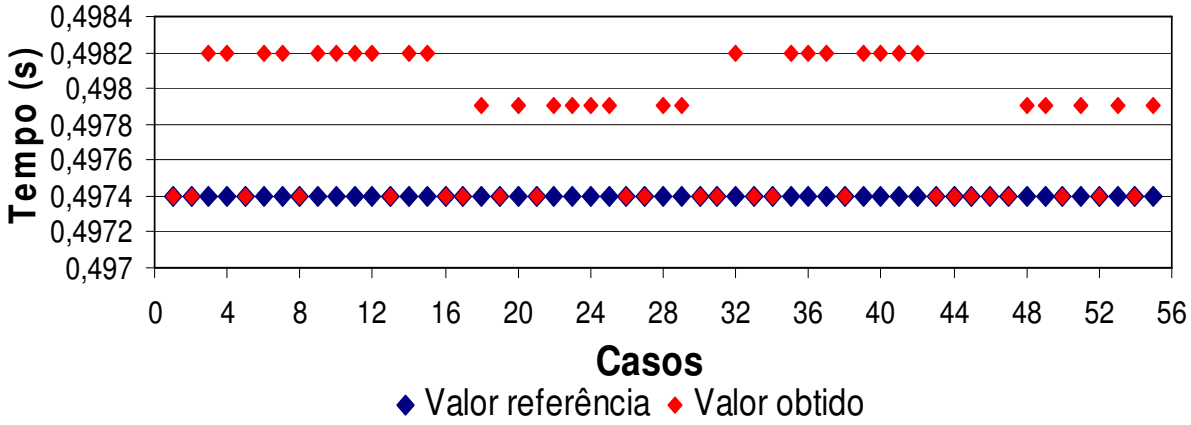


**Figura 42 – Instantes iniciais para os casos de elevação de tensão inseridos à 0º.**

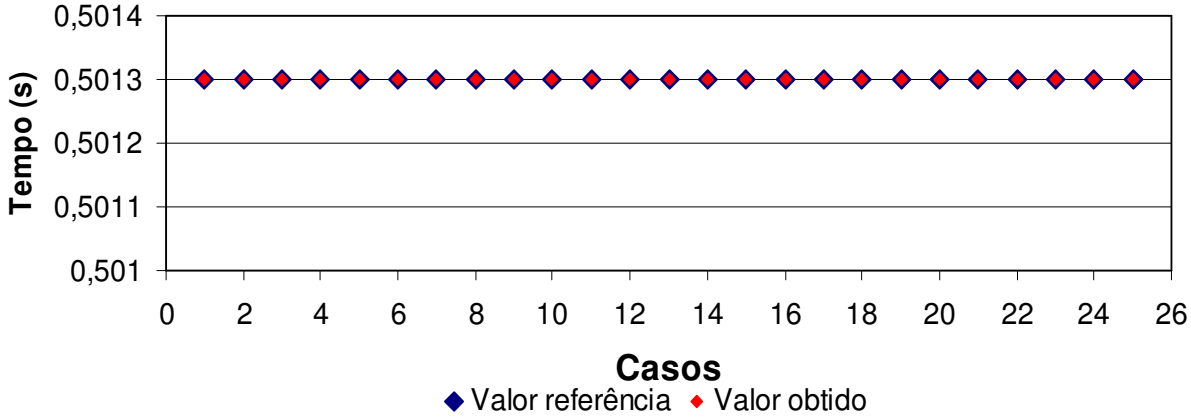


**Figura 43 – Instantes iniciais para os casos de elevação de tensão inseridos à 90º.**

A Figura 44 ilustra os instantes iniciais acusados pela lógica implementada para os casos de afundamentos de tensão com uma inserção à 0º. Adianta-se que os casos de interrupção de tensão apresentaram resultados similares ao de afundamento.

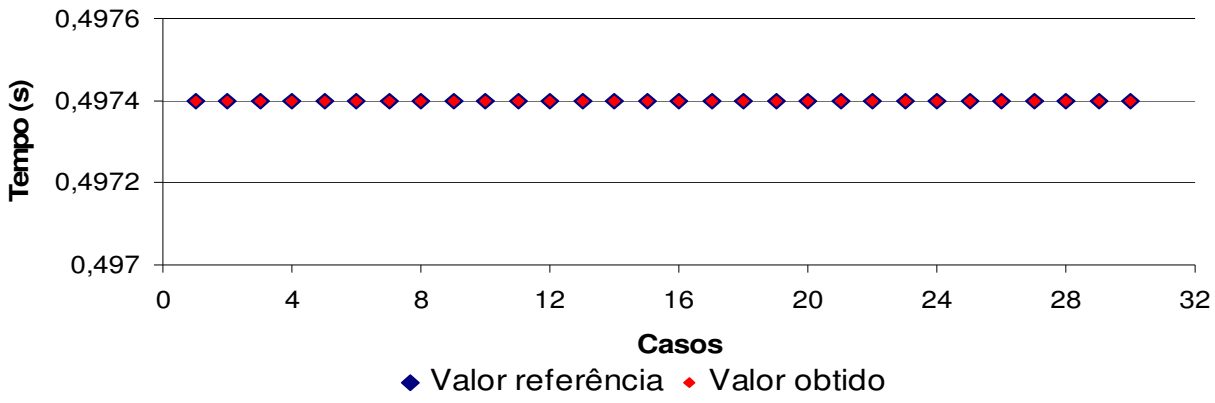


**Figura 44 – Instantes iniciais para os casos de afundamento de tensão inseridos à 0º.**

O instante inicial para as situações indicando uma VTLD está representado na Figura 45. De acordo com esta figura, pôde-se verificar que o algoritmo apresentou uma diferença entre o valor obtido e de referência de 0,2 ms. Esta equivale a uma amostra, quando respeitada a freqüência de amostragem em uso.

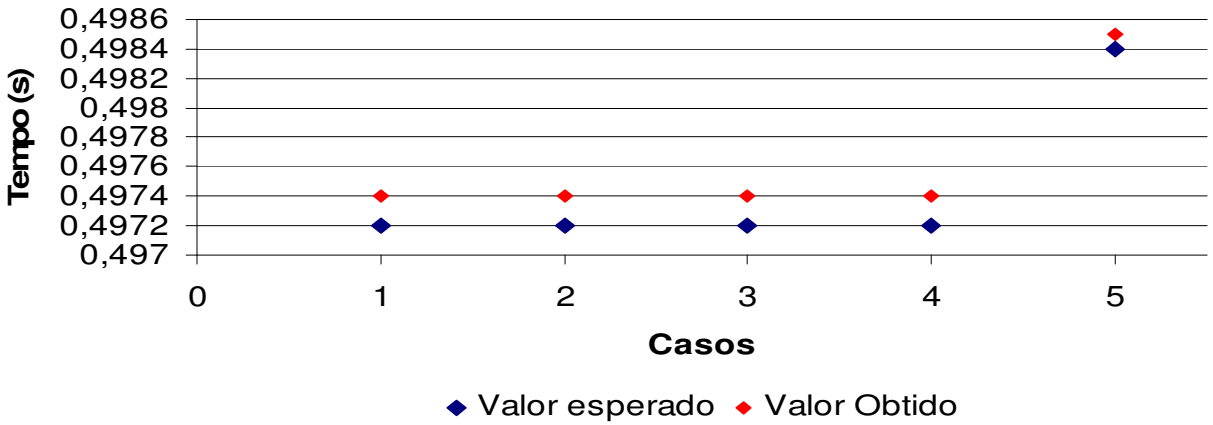


**Figura 45 – Instantes iniciais para os eventos de VTLD inseridos à 0º e medidos na fase A.**

Vale afirmar que de uma maneira geral, o algoritmo apresentou um erro médio de 0,126 ms para os todos os 171 casos testados. Este erro foi calculado levando-se em consideração a diferença entre o valor real e o valor obtido, sendo calculada então a média destes valores.

A Tabela 17 apresenta sucintamente os resultados obtidos para a função de detecção do início das descontinuidades de todos os 171 casos considerados.

**Tabela 17 – Resultados da detecção do início das alterações da forma de onda.**

| | *Ângulo de incidência* | *Início real dos distúrbios* | *Início (média) obtido pelo software* | *Erro médio encontrado (ms)* |
|---|---|---|---|---|
| Afundamento | 0 | 0,4974 | 0,4974 | 0 |
| | 90 | 0,5013 | 0,5013 | 0 |
| Elevação | 0 | 0,4974 | 0,49777 | 0,36 |
| | 90 | 0,5013 | 0,5016 | 0,011 |
| Interrupção | 0 | 0,4974 | 0,4974 | 0 |
| | 90 | 0,5013 | 0,50131 | 0,05 |

Pelos resultados observados na Tabela 17, verifica-se que o algoritmo veio a determinar o momento inicial de tais distúrbios com um pequeno erro quando comparado ao real início dos mesmos.

Nas Figuras 17 e 20 (item 4.1.2), tem-se a representação da detecção do início e do fim da primeira descontinuidade de um caso ilustrativo. Verifica-se por estas figuras, como já comentado anteriormente, que o apontamento da segunda descontinuidade está caracterizando o início do afundamento de tensão manifestado sobre o sinal em análise. Agora, pela abordagem proposta, tanto o ponto onde é detectado o começo quanto o término do evento como um todo podem ser acusados. Sendo assim, o algoritmo realiza nada mais que a divisão do sinal em análise, separando-o em segmentos, indicados quando da ocorrência das alterações na forma de onda em análise.

Apesar de não ser foco deste trabalho, vale comentar que muitos dos afundamentos e/ou elevações de tensão observadas foram precedidos na sua forma de onda por oscilações transitórias. Destas situações, 21 dos 171 casos, apresentaram erro no que diz respeito ao fim

do transitório evidenciado. Para estes casos, o ponto onde foi acusado o término da primeira alteração da forma de onda (transitório), foi apontado antes do seu valor real. Tais situações referem-se às oscilações transitórias de maior amplitude nos casos analisados. Estes casos vieram a apresentar um comportamento quase que periódico após determinado tempo, e a TW veio a apontar o início de outra descontinuidade sobre o sinal.

Cuidado especial foi dado para não se confundir o término de um evento. Ou seja, a volta do sistema às condições normais de operação, com as alterações da forma de onda em análise. Pois em um sinal em análise, poderemos ter mais do que uma alteração na forma de onda.

Para a detecção do término do evento, o algoritmo apresentou um erro médio de 0,23 ms para os casos de elevação, 0,1931 ms para os de afundamento e 0,1649 ms para os casos de interrupção no fornecimento da energia.

Já para os casos de longa duração tem-se 0,18 ms para subtensão, 0,382 ms para sobretensão e 0,19 ms para os casos de interrupção sustentada. As Figuras 46, 47 e 48 trazem respectivamente, os instantes finais apontados pelo algoritmo para os casos de elevação momentânea a 90°, afundamento temporário a 0° e para os casos de sobretensão.

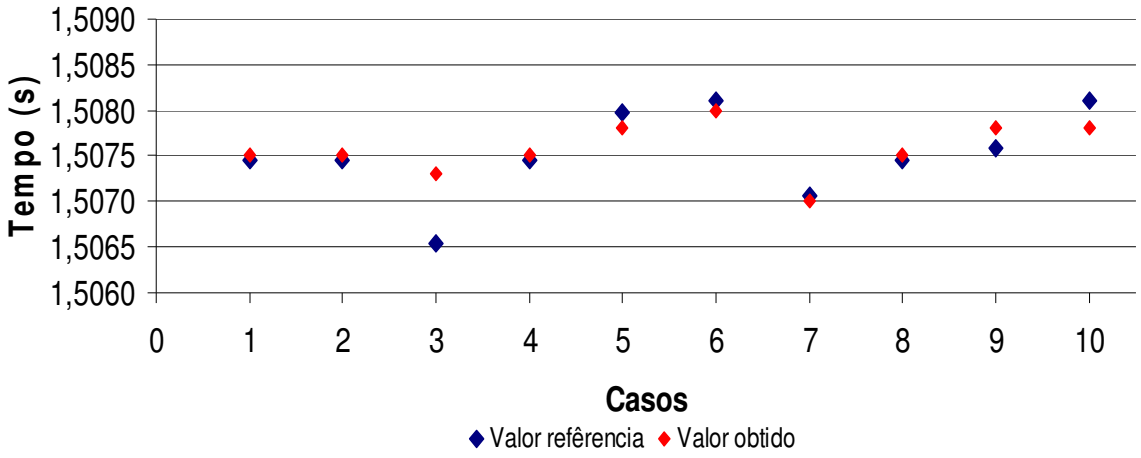


**Figura 46 – Final dos eventos para os casos de elevação momentânea à 90°.**

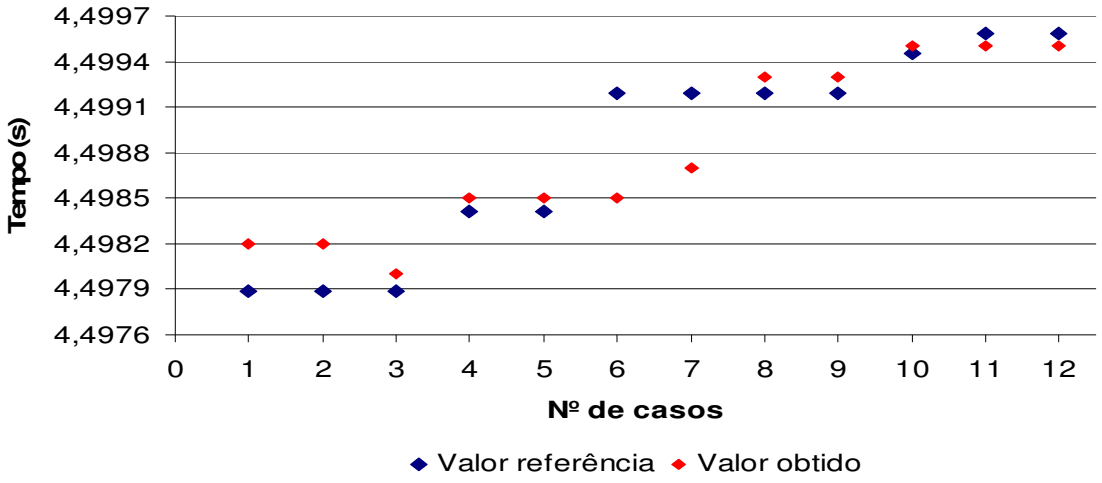


**Figura 47 – Final dos eventos para os casos de afundamento temporário à 0°.**

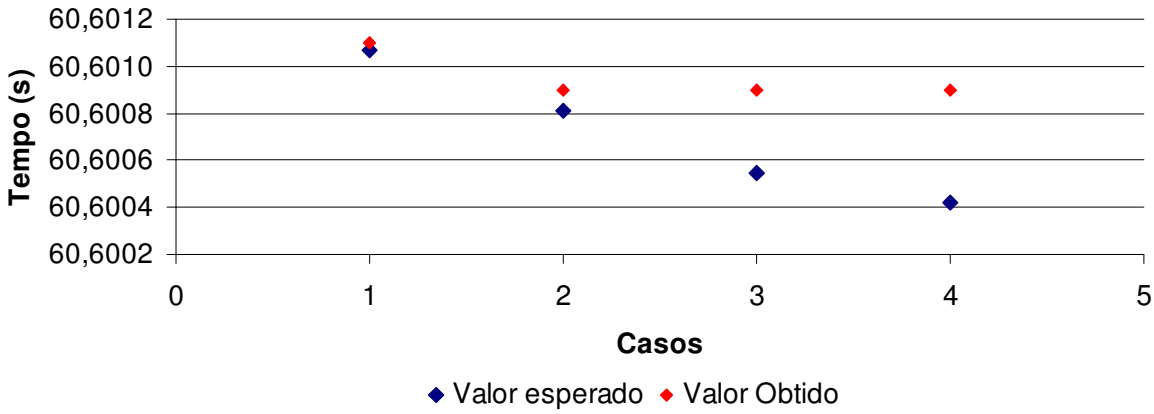


**Figura 48 – Final dos eventos para os casos de subtensão.**

## 6.2 Determinação da duração dos eventos

Conforme comentado anteriormente, de posse dos pontos de alteração na forma de onda e com a sua localização temporal, foi possível determinar a duração dos eventos.

Como pode ser observado, este módulo está diretamente relacionado com o módulo de detecção. Assim, quando se tem uma detecção precisa, obtêm-se uma correta determinação da duração dos eventos. Desta maneira, os resultados obtidos pelo algoritmo foram satisfatórios, onde cada evento detectado teve sua duração calculada. Neste contexto, para a determinação

do percentual de acerto, foi comparada a duração total obtida pelo algoritmo com a duração total do distúrbio analisado. Assim, o algoritmo apresentou um acerto médio em relação à duração do distúrbio de 99,98% (que reflete a um erro de 0,17 ms com relação ao tempo real da duração) para os casos de interrupção, 99,99% (refletindo em 20 ms com relação ao tempo real) para os casos de afundamento e de 99,95% para elevação de tensão. Para os casos de VTLD obteve-se um índice que reflete 99,99% de acertos, sendo de 0,1 ms, 0,15 ms e 0,5 ms para a interrupção sustentada, subtensão e sobretensão, respectivamente, quando comparado aos reais tempos de persistência destes fenômenos sobre o sistema.

## 6.3 Pré-classificação dos distúrbios com relação ao tempo

Como visto no capitulo 4, após a detecção dos pontos de alteração do sinal, têm-se os instantes de ocorrência dos mesmos. Com estes pontos é possível pré-classificar os eventos levando-se em consideração a duração dos mesmos. Logo, o percentual de acerto deste módulo depende exclusivamente da determinação dos pontos das descontinuidades. Vale lembrar que para os casos onde a duração do evento apontada foi inferior a 0,5 ciclos, o algoritmo os pré-classifica, como Desconformidade na Forma de Onda (DFO), requerendo uma posterior classificação em transitório e/ou em desconformidade na forma de onda propriamente dita.

Para os casos onde ocorreram eventos transitórios com duração superior a 1 ciclo, o algoritmo os pré-classificou como sendo VTCD. Quando da etapa da classificação da ocorrência, um refinamento destas situações será averiguado, analisando se as mesmas possuem um comportamento associado a uma VTCD ou à de uma oscilação transitória.

Dos 171 casos analisados, o algoritmo apresentou 100% de acerto quanto a está pré-classificação.

## 6.4 Classificação final dos eventos

Como anteriormente explanado, para a classificação foram empregadas três ferramentas distintas. A transformada *Wavelet* discreta, a transformada rápida de *Fourier* e o valor RMS. Contudo, aqui será apresentada somente a classificação final obtida na saída do módulo de decisão lógica. Justifica-se tal posição devido ao interesse deste estudo ser na classificação final, mesmo que seja possível obter do algoritmo uma resposta individual para cada ferramenta. Assim, os eventos foram classificados em: afundamento, elevação, interrupção de tensão, subtensão, sobretensão, interrupção sustentada, oscilação transitória e desconformidade da forma de onda.

Adianta-se que o percentual de acerto do algoritmo foi altamente satisfatório. Para os casos de VTCD e VTLD este apresentou 99,3% de acerto.

Para os eventos transitórios, o algoritmo apresentou dois tipos de respostas para os casos com duração superior a ½ ciclo. O mesmo classificou estes eventos, ou como oscilação transitória ou em alguma VTCD precedida de oscilação transitória, por exemplo, afundamento precedido de oscilação transitória amortecida.

A segunda situação apresentada acima pode ser observada na Figura 48. Esta figura ilustra apenas a parte do sinal onde ocorreu o inicio do evento. Este é um sinal com afundamento de tensão momentâneo de 0,42 p.u., causado por uma falta fase A-terra. Tal situação faltosa foi aplicada próxima ao transformador TP1 (Figura 31), com resistência de falta de 0,01 ohms e ângulo de incidência da falta de 90º. Nesta figura temos a representação dos pontos de detecção realizada pelo algoritmo, representados pelos pontos 1, 2, 3 e 4. Logo, nesta porção do sinal em análise, têm-se três dos quatro eventos detectados pelo algoritmo. O final

deste evento está representado na Figura 50. Assim, para exemplificar a etapa de classificação, utilizaremos as Figuras 49 e 50.

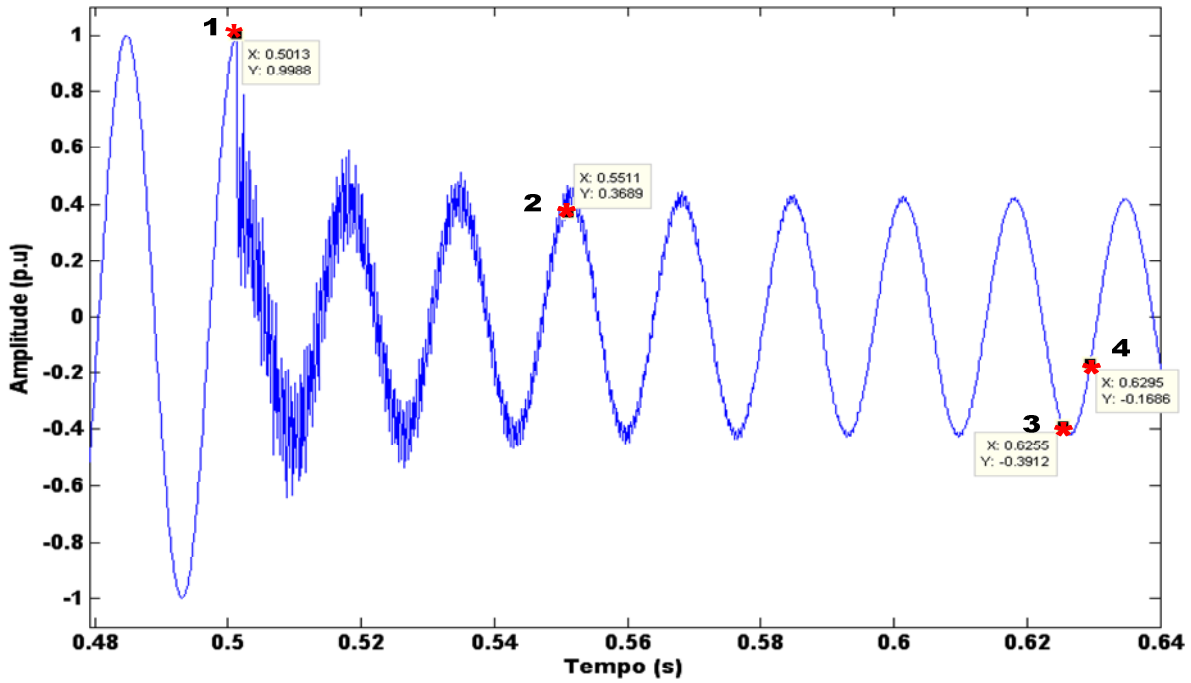


**Figura 49 – Porção do sinal em análise que caracteriza uma oscilação transitória quando do instante do distúrbio**

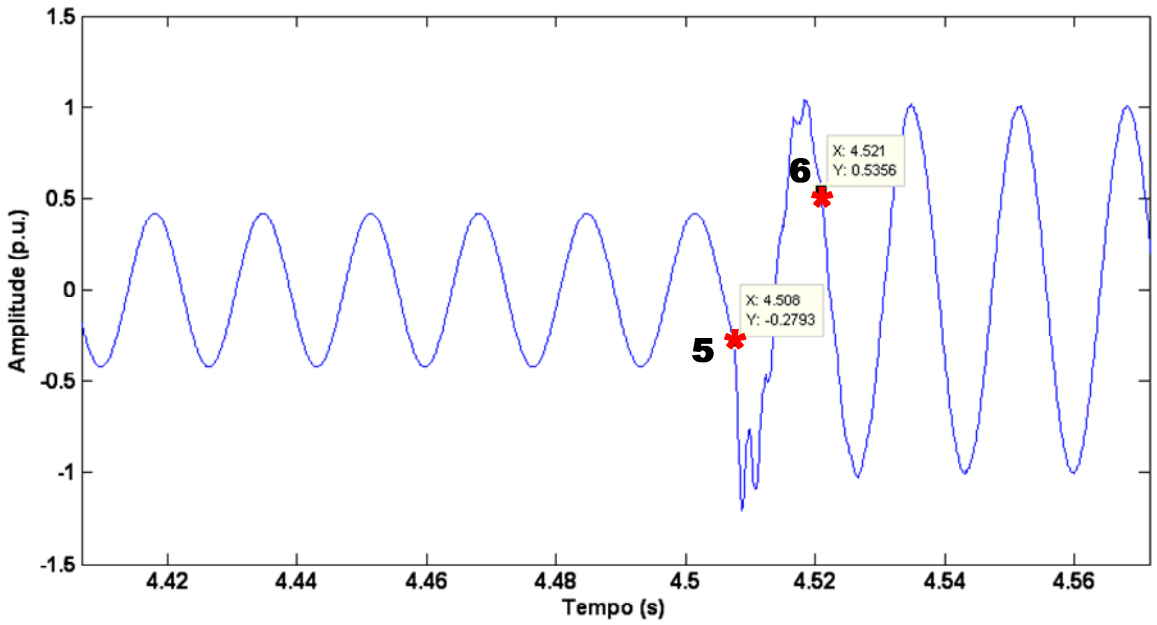


**Figura 50 – Porção do sinal em análise que caracteriza o instante final do distúrbio**

Para este sinal, o algoritmo detectou a ocorrência de cinco eventos. Analisando a Figura 49, podem-se ver três destes eventos. Do ponto 1 ao ponto 2, tem-se o primeiro evento. Este evento foi pré-classificado como VTCD, devido a sua duração de 49,7 ms. Observando este primeiro evento, pode-se ver que o sinal apresentou uma oscilação transitória inicial que foi sendo amortizada com o passar do tempo e que juntamente com esta oscilação existe um afundamento de tensão. Assim, o algoritmo classificou corretamente esta situação como sendo um afundamento de tensão precedido por uma oscilação transitória amortecida. Já na situação entre os pontos 2 e 3, o evento ainda ocorre, mas de maneira mais atenuada. Este segundo evento também foi classificado como um afundamento precedido de oscilação transitória amortecida. O terceiro evento seria entre os pontos 3 e 4. O algoritmo detecta uma pequena alteração, e a classifica como desconformidade na forma de onda. O quarto evento seria do instante 0,6295 s, apresentado na Figura 50 pelo ponto 4, ao instante 4,5081 s, ponto 5 apresentado na Figura 50. O mesmo foi classificado como um afundamento de tensão. E entre os pontos 5 e 6 temos uma desconformidade da forma de onda, cuja duração foi de 0,013 s.

## 6.5 Amplitude

Como comentado no capítulo 4, a amplitude do evento pode ser calculada pelas três ferramentas de classificação, sendo que pelo módulo de decisão lógica, determina-se qual destas irá fornecer o valor da amplitude. Os gráficos apresentados pelas Figuras 51, 52 e 53 ilustram os resultados obtidos pelo algoritmo, tomando-se como base os valores desejados e os obtidos para a amplitude, quando da apresentação ao algoritmo das situações de afundamento, interrupção e elevação de tensão.

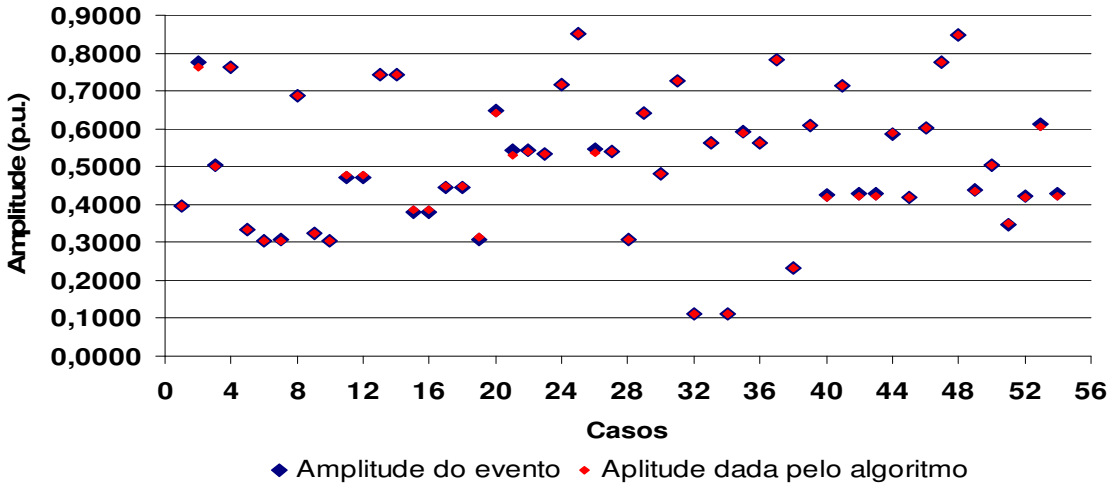


**Figura 51 – Amplitudes para os 53 casos de afundamento analisados.**

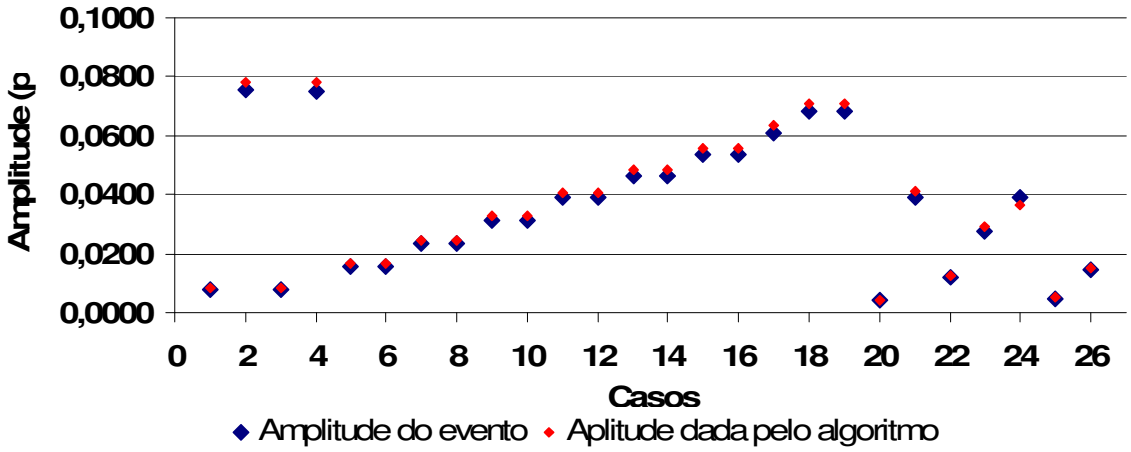


**Figura 52 – Amplitudes para os 26 casos de interrupção de tensão analisados.**

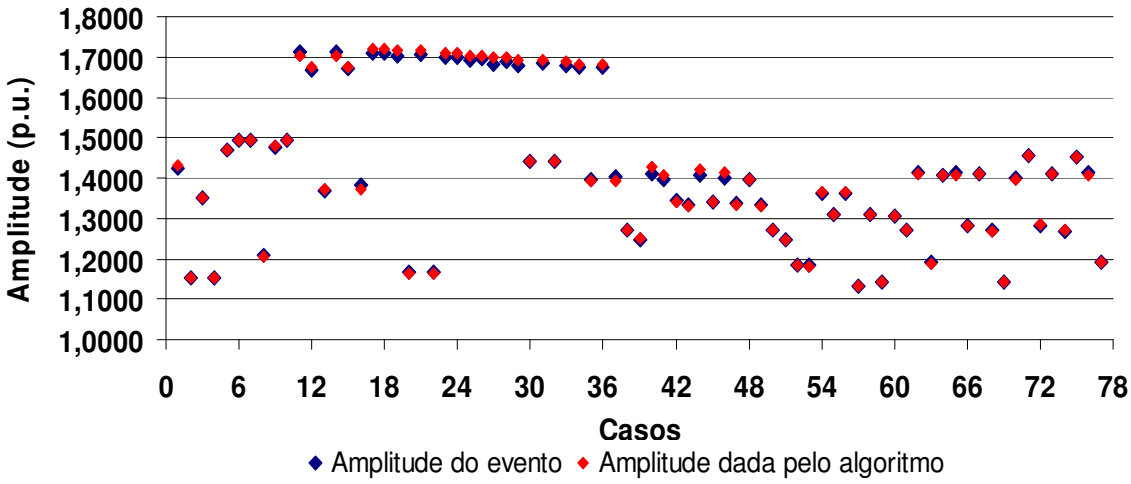


**Figura 53 – Amplitudes para os 77 casos de elevação de tensão analisados.**

Pelas figuras apresentadas, pode-se verificar que o valor da amplitude obtido pelo algoritmo, aproximou-se muito do valor real em todos os casos reportados.

Afirma-se que o algoritmo apresentou um percentual de erro relativo de 0,61% para todos os casos de afundamento, de 0,295% para os de elevação, de 4,52% para os de interrupção, 0,038% para os casos de sobretensão, 0,28% para os casos de subtensão e para os casos de interrupção sustentada, o algoritmo não apresentou erro.

## 6.6 Resultados sobre as situações de faltas geradas no ATP para a validação do algoritmo dispondo do segundo e distinto sistema de distribuição real

Para os eventos descritos no Capítulo 5 (Seção 5.2), foram analisadas todas as etapas do algoritmo proposto: detecção e localização das alterações da forma de onda no sinal, determinação da duração dos eventos, pré-classificação, classificação e determinação da amplitude.

Quanto à detecção, o algoritmo acusou o início e o fim de todos os eventos, apresentando um erro médio de 0,25 ms para o início dos casos de afundamento de tensão, e de 0,42 ms para os de elevações de tensão. Para o fim do evento, o erro médio obtido foi de 0,85 ms em relação ao ponto exato do fim dos casos de elevação, e de 0,20 ms para os casos de afundamento avaliados.

Para a determinação da duração dos eventos, tem-se um índice percentual de acerto de 98,89% (refletindo em 3,37 ms com relação ao tempo real) para os casos de elevação de tensão e 99,91% (ou seja, 0,29 ms com relação ao tempo real) para os casos de afundamento de tensão.

Afirma-se que o algoritmo conforme proposto, veio a classificar corretamente tantos os eventos de VTCD (elevação e afundamento de tensão) como os eventos com duração inferior a ½ ciclo.

Já para as amplitudes dos eventos analisados, o erro médio apontado pelo algoritmo foi de 1,02% para todos os casos de afundamento e de 0,46% para os casos de elevação de tensão.

## 6.7 Comentários parciais e divulgação dos resultados encontrados

Analisando o desempenho de todas as funções desempenhadas neste algoritmo, temos que em todas as etapas, este veio a apresentar respostas promissoras e condizentes com o esperado.

Vale firmar que para a função de detectar e localizar as alterações na forma de onda dos sinais apresentados, a lógica implementada apresentou um erro médio para a acusação do início do distúrbio de 0,8 ms para os todos os casos de VTCD e um erro médio de 0,2 ms para os de VTLD.

Para a estimação da duração dos distúrbios de VTCD e VTLD, bem como para a pré-classificação dos mesmos, o algoritmo obteve uma ótima resposta frente às situações avaliadas, evidenciando um índice de 100% de acerto.

Para a classificação final, novamente obteve-se um excelente resultado, com valores acima de 99% de acerto no contexto delineado.

Quanto a amplitude, a lógica manipulada veio a apresentar erros inferiores a 5% para os casos de interrupção e, para as situações restantes, erros inferiores a 1%.

Conforme já apontado, alguns trabalhos encontrados em literatura correlata apresentam resultados que podem ser comparados aos observados nesta pesquisa.

Na dissertação apresentada em [45], o autor também propõem um algoritmo para caracterização de distúrbios relacionados à QEE. Para a detecção e localização dos distúrbios, o mesmo utiliza a TW em AMR nível 2, com janelas de ½ ciclo e passo de ¼ de ciclo, apresentando um erro médio de 1%. Para a classificação, foi calculada a curva de desvio padrão, utilizado o teorema de Parseval, sendo indicada uma taxa de acerto geral de 98,9%. Para a estimação da duração do distúrbio, o sinal é decomposto até o 3º nível, apresentando uma taxa de acerto de 95,3%. Já para a estimação da amplitude, calcula-se a relação entre o sinal com o distúrbio e o sinal em regime. A estimação da amplitude e a duração do distúrbio são aplicadas somente para os as VTCD em análise. Para estes casos o índice de acerto foi de 99,7%. Contudo, neste trabalho não é contemplado os eventos transitórios que precedem o evento principal.

Na tese descrita em [46], o autor segue uma linha muito próxima à apresentada em [51]. Ele propõe uma técnica para detectar, localizar no tempo e classificar diversos fenômenos relacionados com a QEE. Para a detecção, utiliza-se somente da TW e, para a classificação, foram comparadas três ferramentas matemáticas: TW, TRF e RNA. Para validar o algoritmo, foram utilizados dados de um sistema elétrico da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Fransisco). Com estes, obteve-se para a detecção resultados superiores a 95% utilizando a TW. Na classificação, o maior problema enfrentado foi à ocorrência da simultaneidade de eventos sobre os sinais em análise. Para solucionar este problema, fez-se uma segunda classificação, tomando-se um ciclo a partir do distúrbio propriamente dito. Com isso, obteve-se um acerto médio de 90%.

Em [47], o autor apresenta uma análise de distúrbios da QEE com a TW. É calculada a diferença dos coeficientes entre o detalhe do primeiro nível do sinal com distúrbio com o do

sinal em RP, para a detecção dos eventos. Por esta lógica, obteve-se 100% de acerto para a detecção dos eventos. Para a classificação, também é realizada esta diferença entre os sinais, mas com energia do sexto detalhe. Para a estimação da amplitude foram utilizados os coeficientes da quinta aproximação, apresentando um erro médio de 2,3%, sendo que para a estimação da duração, alguns casos apresentaram erro superior a 10%. O autor deixa clara a dificuldade encontrada em se estipular um limiar que venha a corretamente diferenciar entre afundamento e interrupção no fornecimento da energia.

Cada um dos trabalhos acima citados, apesar de apresentarem excelentes resultados, possui algumas dificuldades em relação a eventos simultâneos, interferindo assim nas tarefas de detectar e de classificar as ocorrências no contexto da QEE. Outro ponto, diz respeito às analises terem sido efetuadas sobre um único evento principal, não se tendo a preocupação de continuar a análise sobre o sinal ou o arquivo de dados apresentado.

Logo, o grande diferencial deste trabalho conforme apresentado, foi o fato de se separar os eventos transitórios do evento principal, facilitando assim a escolha da ferramenta que irá realizar a classificação tanto de um como do outro evento. Desta maneira, aumenta-se assim a eficiência do algoritmo na classificação dos eventos.

Outro ponto que merece destaque em função da separação dos *n* possíveis eventos sobre o sistema em análise é a definição de *n* janelas com tamanhos/comprimentos distintos e flexíveis. Somente por este indicativo, conforme reportado pode-se optar dentre as ferramentas disponibilizadas qual poderá vir a apresentar resultados confiáveis.

Ainda com relação às inovações, por este foram disponibilizadas três ferramentas à lógica computacional implementada e, destas, um relatório completo sobre o sinal em análise pôde ser caracterizado. Tal relatório é compilado em função da “melhor resposta” apresentada quando da combinação das técnicas empregadas.

Para finalizar, como conseqüência da realização e aceitação deste trabalho, artigos completos foram ou estão em vias de publicação em congressos nacionais e em um internacional. A referência [61] compreende um estudo para detecção, localização e classificação de distúrbios de QEE dispondo da TW e SF, sendo o mesmo apresentado na Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE), no ano de 2007. Na mesma linha de resultados, em [62] encontra-se um sistema para a análise da QEE, dispondo das duas ferramentas anteriormente citadas e do cálculo do valor RMS. Este trabalho foi apresentado no *Latin American Congress: Electricity Generation And Transmission* (CLAGTEE), no ano de 2007. Além destas duas participações, uma futura fonte para consulta serão os anais do Congresso Brasileiro de Automática (CBA), a ser realizado ainda em 2008, aonde o trabalho já recebeu parecer favorável a sua apresentação.

# 7. CONCLUSÕES E CONTINUIDADE DO TRABALHO

Como observado, a ocorrência de pequenos distúrbios no sistema elétrico de potência pode provocar interferências indesejadas no funcionamento dos equipamentos mais sensíveis. Com isso, para uma melhor caracterização dos distúrbios que degradam a qualidade da energia elétrica, faz-se necessária a utilização de novas ferramentas de processamento de sinais que permitam traçar o comportamento de cada anomalia em especifico. Desta forma, justifica-se a aplicação da Transformada *Wavelet*, por esta ser uma ferramenta capaz de fornecer simultaneamente informações importantes, tanto no domínio do tempo como no domínio da freqüência de um dado sinal elétrico.

Neste sentido, para a realização desta pesquisa foram analisadas situações distintas de elevação, afundamento e interrupção de tensão, caracterizando variações de tensão de curta duração, e de variações de longa duração, caracterizadas por sobretensão, subtensão e interrupção sustentada. Para a geração destes dados, foi utilizado a interface *ATPDraw* para modelar um sistema de distribuição de energia elétrica. Sobre este sistema foram simulados distúrbios de curta duração e longa duração, que foram utilizados para testar e validar o algoritmo de detecção, localização e classificação no tempo.

As etapas de detecção e localização das alterações do sinal foram realizadas utilizando a técnica da análise multiresolução, fundamentada na TWD.

Pelos resultados observados e reportados neste documento, conclui-se que a TW foi utilizada com sucesso, pois ofereceu bons resultados nas etapas de detecção e localização de distúrbios de curta e longa duração no sistema de potência analisado.

Por meio da localização das alterações/descontinuidades na forma de onda, foi possível obter janelas de dados com tamanhos flexíveis, sendo um diferencial deste trabalho comparado às técnicas existentes. As informações disponibilizadas pela etapa de localização serão posteriormente utilizadas na fase de classificação dos distúrbios. Tal flexibilidade permitiu uma adequada escolha de qual ferramenta poderia ser mais bem utilizada, já que certas ferramentas apresentam limitações a este parâmetro.

Para a estimação da duração dos distúrbios de variação de tensão de curta e de longa duração e a pré-classificação dos mesmos em distúrbios momentâneos, temporários e de longa duração, respectivamente, o algoritmo explora com eficiência a capacidade da TW em abstrair as características intrínsecas, obtendo-se assim uma resposta satisfatória frente às situações avaliadas.

No que dizem respeito à classificação, as três ferramentas foram também empregadas (TW, o valor RMS e a TRF). Estas, de acordo com o tamanho da janela de dados, realizavam a classificação do evento. De acordo com a resposta apresentada por cada ferramenta, o algoritmo escolhe, através do módulo de decisão lógica, qual a melhor indicada, apresentando, destas, uma única solução.

O diferencial desta abordagem é que se consegue aproveitar a potencialidade de cada ferramenta, em relação aos distúrbios estudados. Um outro ponto a ser considerado e evidenciado é a classificação dos eventos com duração inferior a ½ ciclo, que até então, na literatura consultada e reportada neste documento, eram desprezados.

Destaca-se que a eficiência desta metodologia para a classificação dos eventos, apresentou um índice médio acertos de 98,4% para todas as situações avaliadas e descritas anteriormente.

No fechamento da proposta, evidencia-se que o algoritmo como apresentado, mostrou-se eficiente para a análise dos distúrbios simulados. Todas as situações analisadas foram corretamente detectadas e localizadas no tempo, dentro de valores percentuais aceitáveis em comparação a literatura consultada.

Conforme visto nos resultados apresentados na seção 6.6, o algoritmo apresentou resultados satisfatórios em situações de VTCD advindos de outro sistema real, também simulado no ATPDraw.

Como continuidade deste trabalho, pode-se destacar:

- Aplicar a Transformada *Wavelet* na avaliação de outros distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica;
- Testar e comparar os resultados observados para a classificação quando efetuada por técnicas computacionais inteligentes;
- Validar toda a lógica implementada frente às medições reais registradas em campo;
- Estudar a possibilidade de implementar a Transformada *Wavelet* em *hardware* e
- Propiciar uma generalização ao algoritmo apresentado, de maneira a ser portável às várias nuance de todas as variáveis envolvidas.

# 8. REFERÊNCIAS


[1] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical power system quality**. New York, MacGraw-Hill, 1996.

[2] BELISÁRIO, C. D. A.; BAHIENSE, D. A.; OLIVEIRA, G. M. **Continuidade nos Serviços de Distribuição de Energia Elétrica**, Conj. & Planej., Salvador: SEI, fev 2003, n. 105, p. 36-40

[3] ANEEL - Resolução 24 - **Continuidade da distribuição de energia elétrica.** Disponível em: http://www.aneel.gov.br/biblioteca.cfm.

[4] ANEEL - **Resolução 505 Conformidade dos níveis de tensão.** Disponível em: http://www.aneel.gov.br/biblioteca.cfm.

[5] BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL – **Procedimentos de Distribuição – Módulo 8 – *Versão Atual* (ProDist),** Brasilia, 19 fev. 2008**.** Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1371>. Acesso em: 03 abr. 2008.

[6] BOLLEN, M. H. J. & GU, I. Y. H.; **Signal processing of power quality disturbances.** Piscataway-NJ, EUA: Wiley-Interscience, 2007. 861 p. IEEE Press Series on Power Engineering.

[7] IEEE Std 1159 **Recommended Practice for Monitoring electric Power Quality**: IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality, 1995.

[8] SANTOSO, S., POWERS, E. J., GRADY, W. M., HOFMANN, P.; **Power Quality Assessment Via Wavelet Transform Analysis.** IEEE Transaction on Power Delivery, v. 11, n. 2, p.924-930, April 1996.

[9] LEE, C.H.; LEE, J.S.; KIM, J.O.; NAM, S.W., **Feature vector extraction for the automatic classification of power quality disturbances**, In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS ANS SYSTEMS, ISCAS '97., v.4, p.2681 - 2684 , 9-12 June 1997.

[10] **Alternative Transients Program** (ATP) Rule Book, by Canadian/American EMTP user group, 1992.

[11] KOPPARAPU, C.; CHANDRASEKARAN, A.**; A study on the application of wavelet analysis to power quality**. In: PROCEEDINGS OF THE THIRTIETH SOUTHEASTERN SYMPOSIUM ON SYSTEM THEORY, p.350 – 353. 8-10 March 1998.

[12] BRITO, N.S.D.; SOUZA, B.A.; PIRES, F. A. C.**; Daubechies wavelets in quality of electrical power,** In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER PROCEEDINGS, v.1, p.511 - 515. Athens, Greece, Octuber 14-16, 1998.

[13] POISSON, O.; RIOUAL, P.; MEUNIER, M.**; New signal processing tools applied to power quality analysis**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 2, p.561 – 566, April 1999.

[14]DASH, P.K.; et al**. ; Power quality monitoring using an integrated Fourier linear combiner and fuzzy expert system**, International journal of electrical power and energy systems, vol. 21, n°7, p. 497-506.Oct. 1999.

[15] SANTOSO, S.; GRADY, W.M.; POWERS, E.J.; LAMORRE, J.; BHATT, S.C.; **Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms**, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 1, p.247 – 254, Jan. 2000.

[16]ELMITWALLY, A.; et. al.; **Proposed wavelet-neurofuzzy combined system for power quality violations detection and diagnosis,** Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings- v. 148, n. 1, p.15 – 20, Jan. 2001.

[17]KEZUNOVIC, M.; **Automated analysis of voltage sags, their causes and impacts**, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, v.2, p.1113 – 1117, 2001.

[18]KEZUNOVIC, M.; LIAO, Y**.** , **A novel software implementation concept for power quality study**, IEEE Transactions on Power Delivery - v.17, n. 2 p. 1113 – 1117. Apr. 2002.

[19] XIANGXUN, C.; **Wavelet-based detection, localization, quantification and classification of short duration power quality** disturbances, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. v. 2, p. 931 – 936, 27-31 Jan. 2002.

[20] HUANG, J.; NEGNEVITSKY, M.; NGUYEN, D.T.; **A neural-fuzzy classifier for recognition of power quality disturbances,** IEEE Transactions on Power Delivery**,** v. 17, n. 2, p.609 – 616. Apr. 2002.

[21] WANG, Z.Q.; ZHOU, S.Z.; GUO, Y.J.; **Comparisons on ways of magnitude characterization of power quality disturbances**, In: LESCOPE 02 – LARGE ENGINEERING SYSTEMS CONFERENCE ON POWER ENGINEERING , p.178 - 183 , 26-28 June 2002.

[22] WANG, Z.Q.; ZHU, S.Z.; **Comparative study on power quality disturbance magnitude characterization,** In: POWERCON 2002 – INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, v. 1, p.106 – 111, 13-17 Oct. 2002.

[23] SHAH BAKI, S.R.; ABDULLAH, M.Z.; AbIDIN, A.F**.; Combination wavelets and artificial intelligent for classification and detection transient overvoltage**, In: STUDENT CONDERENCE ON RESEARCH AND DEVELOPMENT, p.177 – 180. 2002.

[24] MUKERJEE, R.N.; TANGGAWELU, B.; ARIFFIN, A.E.; BASHA, A.; **Detection and identification of voltage disturbances via clustering and wavelets,** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY (PowerCon), v.1, p.125 - 129 . 13-17 Oct 2002.

[25] MUKERJEE, R.N.; TANGGAWELU, B.; ROGERS, G.J.; SOYAT, S.**; Fuzzy classification based identification of voltage sag via wavelets,** In: 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL INFORMATION PROCESSING (ICONIP), v. 5, p.2381 – 2385, 18-22 Nov. 2002.

[26] BOLLEN, M.H.J.; SABIN, D.D.; THALLAM, R.S.; **Voltage-sag indices - recent developments in** IEEE PI564 task force, Page(s): 34- 41

[27] TIWARA, A. K., SHUKLA, K. K.; **Wavelet Transform Based Fuzzy Inference System for Power Quality Classification.** Lecture Notes In Computer Science; v.2275, Proceedings of the 2002 AFSS International Conference on Fuzzy Systems. Calcutta: Advances in Soft Computing, p.148-155. 2002.

[28] ZHU, T.X.; TSO, S.K.; LO, K.L; **Wavelet-based fuzzy reasoning approach to power-quality disturbance recognition,** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 4, p.1928 – 1935. Oct. 2004.

[29] LIAO, Y.; LEE, J.B; **A fuzzy-expert system for classifying power quality disturbances**, Electrical Power and Energy Systems v. 26, n. 3, p.199–205, March 2004.

[30] LATHA MERCY, E.; ARUMUGAM, S.; CHANDRASEKAR, S.**; Fuzzy recognition system for power quality events using spline wavelet**, In: IEEE PES - Power Systems Conference and Exposition, v. 3, p.1502 – 1505. 10-13 Oct. 2004.

[31] SIU, H.K; NGAN, H.W.; **Automatic Power Quality Recognition System using Wavelet Analysis,** In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION, RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES, v.1, p.311-316, 5-8 April 2004.

[32] THAPAR, A.; SAHA, T.K.; ZHAO, Y. D.; **Investigation of power quality categorisation and simulating it's impact on sensitive electronic equipment**. IEEE Power Engineering Society General Meeting**,** p.: 528 – 533, v.1, 6-10 June 2004.

[33] E. C. Inc., "**Electrical Power Systems Quality**," *http://www.electrotek.com*, 1994.

[34] "**Matlab Help files, Simulink**". Matlab 6.0

[35] WANG, J.; WANG, C.; **A classification method of power quality disturbance based on wavelet packet decomposition**, In: IEEE REGION 10 CONFERENCE TENCON 2004. v. 3 C, p.:244 – 247, 21-24 Nov. 2004.

[36] CHOONG, F.; REAZ, M.B.I.; MOHD-YASIN, F; **Power Quality Disturbance Detection Using Artificial Intelligence: A Hardware Approach**, In: 19th IEEE INTERNATIONAL PARALLEL AND DISTRIBUTES PROCESSING SYMPOSIUM. p.146a - 146a, 04-08 April 2005.

[37] CHOONG, F.; REAZ, M.B.I.; MOHD-YASIN, F.; **"Hardware Prototyping of an intelligent Power Quality Disturbance Classifier Employing Discrete Wavelet Transform, Artificial Neural Network and Logic Fuzzy".** IEE Proceedings Electric Power Aplications (Accepetd)

[38] CHEN, S.; **Feature selection for identification and classification of power quality disturbances**. IEEE Power Engineering Society General Meeting. p.2301 - 2306 v. 3, 12-16 June 2005.

[39] ZHU, H.Y.; CHEN, S.**; A Wavelet Transform Method for Characterization of Voltage Variations.** In: PowerCon 2006. INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, p.1 – 7, Oct. 2006.

[40] PEREZ, E.; BARROS, J; **Voltage Event Detection and Characterization Methods: A Comparative Study**. In: TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, TDC ´06. p.1 – 6, Aug. 2006.

[41] "**IEC 61000-4-30. Electromagnetic compatibility (EMC) -** Part 4: Testing and measurement techniques. Section 30: Power quality measurement methods"., 2003.

[42] BIZJAK, B.; PLANINSIC, P.; **Classification of Power Disturbances using Fuzzy Logic.** In: 12th INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE. p.1356 – 1360, Aug. 2006.

[43] WANG, C.; GAO, H.; ZHU, T.; **A New Method for Detection and Identification of Power Quality Disturbance**. In: POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION, 2006. p.1556 – 1561, Oct. 29 2006-Nov. 1 2006.

[44] SHI, M.; WU, Z.; XU, X.; **Detection of Voltage Variation Signal Based on *Double* Wavelet.** In: SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS DESIGN AND APPLICATIONS, v.2, p.730 – 733, Oct. 2006.

[45] DELMONT, O. F. (2003); **Utilização da Transformada *Wavelet* para a caracterização de distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica**; Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

[46] FILHO, O. D.; **Um algoritmo para a detecção, localização e classificação de distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica utilizando a Transformada *Wavelet***; Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2007.

[47] ARRUDA, E. F.D., **Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a Transformada Wavelet**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 2003.

[48] JOHNSON, D.E.; HILBURN, J.L.; JOHNSON, J.R.; **Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos**. Editora LTC, quarta edição, p. 304-305, 2000.

[49] SOUZA, S. A.; **Utilização da Transformada de *Fourier* Janelada para caracterização de distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica**; Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2004.

[50] MISITI, M. et al. (1997). **Wavelet Toolbox**: User`s Guide. Natick, MA

[51] GUIDO, R. C.; **Material das aulas ministradas da disciplina SFI5871-1 - *Introdução à Transformada Wavelet e aplicações*,** ministrada pelo professor Rodrigo Capobianco Guido, no Instituto de Física de São Carlos, IFSC, 2007. 1 CD-ROM.

[52] GUIDO, R. C.; VIEIRA, L. S.; BARBON, S. JR.; SANCHEZ, F. L.; MACIEL, C. D.; FONSECA, E. S., PEREIRA, J. C. **(2007). *A neural-wavelet architecture for voice conversion*. Neurocomputing**, v.71, Issues 1-3, December 2007, Pages 174-180.

[53] ARRUDA, E. F.D., FILHO, O. D., COURY, D. V., CARNEIRO, A. A. F. M. **Um estudo das Famílias Wavelets Aplicadas à Qualidade da Energia Elétrica**, CBA2002, 6p, Natal, RN 2002.

*[54]* IEEE standard C37_111_1991. **"Common Format for Transient Data Exchange for Power System",** 1991

[55] IEEE standard C37_111_1999. ***"Revision: Common Format for Transient Data Exchange for Power System"***. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, n.1, p.116-124., 1999.

[56] COURY, D.V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R., **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. Editora EDUSP, volume 1, p. 11-12., 2007

[57] SMITH, S. W.; **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**. California Technical Publishing, n.2, p. 39-44, 1999.

[58] BARBOSA, D. **Estimação da freqüência em Sistemas Elétricos de Potência através da filtragem adaptativa.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 2007.

[59] Comitê Argentino de Usuários de EMTP/ATP (CAUE) – **Alternative Transients Program Rule Book,** 2002

[60] PRIKLER, L.; HOIDALEN, H. K., **Users' Manual ATPDraw for windows,** 2002.

[61] RODRIGUES, L. C. P.; OLESKOVICZ, M. ; DELMONT FILHO, O. ; USIDA, W. F. ; COURY, D. V. ; CARNEIRO, A. A. F. M. . **Um sistema híbrido para a análise da qualidade da energia elétrica dispondo da transformada wavelet aliada a sistemas fuzzy.** In: VII CBQEE 2007 - Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2007, Santos-SP. Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2007. v. 7.

[62] RODRIGUES, L. C. P.; OLESKOVICZ, M. ; DELMONT FILHO, O. ; CARNEIRO, A. A. F. M. ; USIDA, W. F. ; COURY, D. V. . **Um Sistema Híbrido para a Análise da Qualidade da Energia Elétrica dispondo das Transformadas Wavelet aliadas a Sistemas Fuzzy.** In: Latin American Con-

gress: Electricity Generation And Transmission, 2007, Viña del Mar. Book of Abstracts and Proceedings of 7th Latin American Congress: Electricity Generation And Transmission, 2007. v. 7.

# APÊNDICE A – Guia dos componentes utilizados via ATPDraw.

Neste apêndice será apresentado cada um dos componentes utilizados nas simulações do sistema de distribuição analisado, dispondo do *software* ATPdraw. Para melhor visualização, tem-se no que segue uma nova chamada à figura representativa do sistema elétrico em análise pela Figura 54 Quando da especificação de cada componente, também será comentado quais foram os parâmetros de entrada inseridos e considerados em todo o procedimento (Tabela 18). Quando da necessidade de um melhor detalhamento do apresentado, sugere-se uma consulta ao manual do usuário do ATPDraw [59].

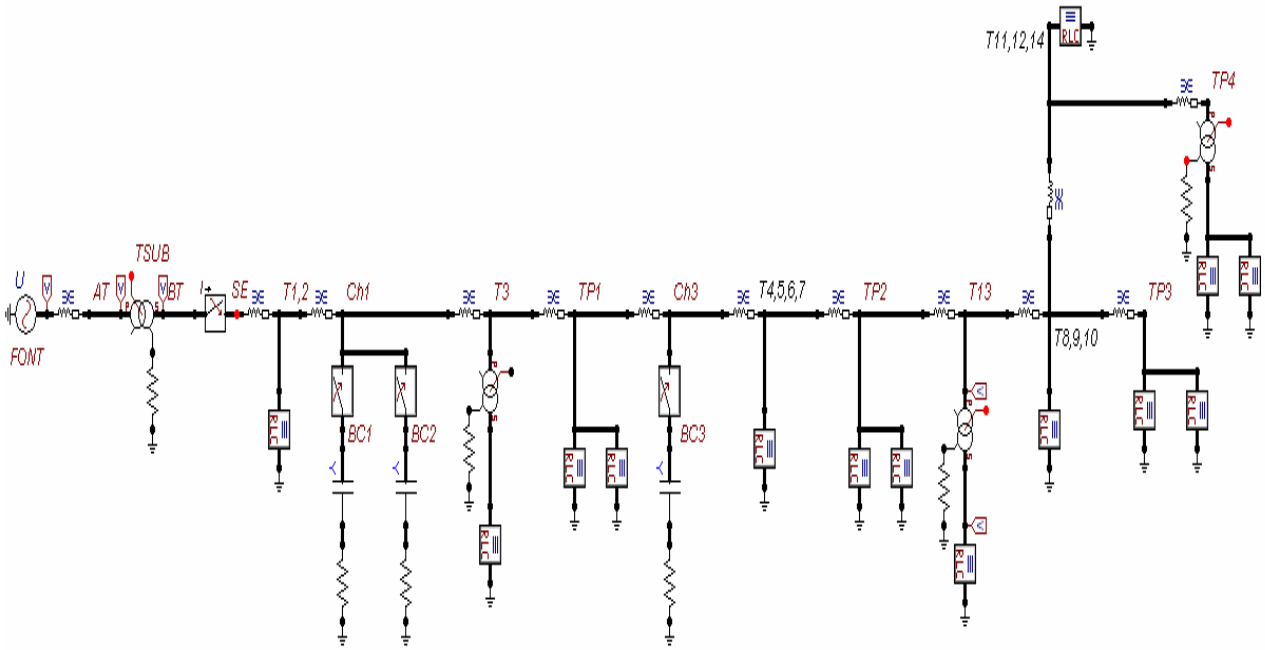


**Figura 54– Representação do sistema elétrico de distribuição no software ATPDraw 5.0**

**Tabela 18 – Relação e descrição dos componentes empregados no decorrer das simulações realizadas.**

| COMPONENTE | USO E PARÂMETROS |
|---|---|
| | Resistor monofásico. |
| | Capacitor trifásico com ligação em estrela. Entrar com valores da capacitância (C) por fase. |
| | RLC série trifásico. Entrar com valores da resistência (R), indutância (L) e capacitância (C) por fase. Este ramo pode ser utilizado como uma combinação entre os elementos. Por exemplo, cargas RL, RC, LC, ou somente R, L ou C. |
| | Chave monofásica controlada por tempo. Faz-se necessário especificar o tempo de abertura e fechamento. |
| | Chave trifásica controlada por tempo. Faz-se necessário especificar o tempo de abertura e fechamento (todas as fases abrem e fecham ao mesmo tempo). |
| | Fonte trifásica AC. Especificar:<br>- Tempo de inicio e parada;<br>- Pico da magnitude;<br>- Freqüência;<br>- Fonte de tensão ou corrente e<br>- Ângulo de fase, em graus ou segundos. |
| | Medidor de tensão fase terra.<br>Especificar para uma, duas ou três fases. |
| | Transformador trifásico saturável . Pode ser de dois ou três enrolamentos. Dados de entrada:<br>- Io - Corrente [A] através do ramo de magnetização;<br>- Fo - Fluxo [Wb-turn] no ramo de magnetização; Obs: o par Io e Fo define a indutância no ramo magnetizante;<br>- Rm - Resistência de magnetização;<br>- Tensão do primário e secundário;<br>- Resistência em ohm dos enrolamentos primário e secundário e<br>- Indutância em ohm dos enrolamentos primário e secundário. |
| | Linha de transmissão simétrica com parâmetros concentrados.<br>- Resistência de seqüência zero e positiva e<br>- Indutância de seqüência zero e positiva. |

# APÊNDICE B – Arquivo de entrada gerado pelo ATPDraw

O *software* ATPDraw descreve o circuito com a mesma sintaxe de um arquivo de entrada comum ao software ATP. Este arquivo apresenta todos os dados do sistema elétrico de distribuição caracterizado via a interface do ATPDraw. No que segue serão apresentados alguns apontamentos dos parâmetros relevantes à simulação. Estes apontamentos serão colocados sobre e de acordo com o arquivo de entrada gerado via ATPDraw a ser executado pelo sofware ATP. O arquivo comentado segue abaixo.

**a) Parâmetros para a simulação**

```
BEGIN NEW DATA CASE
C ------------------------------------------------------
C Generated by ATPDRAW  junho, segunda-feira 16, 2008
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C ------------------------------------------------------

POWER FREQUENCY                        60.
```

**Freqüência do sistema.**

**Passo de integração**

**Tempo final de simulação em segundos.**

```
C  dT  >< Tmax >< Xopt >< Copt >
.0001302    120.
```

**IPLOT:Freqüência com que os pontos são gerados para o arquivo .pl4 durante a simulação. Foi utilizado o valor 1 para que cada ponto possa ser usado graficamente.**

```
 1       1       1       1       1       0       0       1       0
C        1         2         3         4         5         6         7         8
C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

**b) Linhas de transmissão com parâmetros concentrados**

```
/BRANCH
```

```
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R  >< L  >< C  >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R  >< A  >< B  ><Leng><><>0
    nó de saída
    nó de entrada

C IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO SISTEMA REFERIDA EM 138KV
                            R0 - Resistência de seqüência zero;
                                      L0 -  Indutância de seqüência zero;

51FONTA ATA               3.5639      49.013

                            R+ - Resistência de seqüência positiva;
                                      L+ - Indutância de seqüência positiva;

52FONTB ATB               1.1974      18.133
53FONTC ATC

C IMPEDÂNCIA DO TRECHO ENTRE A SE E OS TRAFOS 1 E 2 (T12)
51SE1A  T12A                .183       1.321
52SE1B  T12B                 .45         .35
53SE1C  T12C
C IMPEDÂNCIA DO TRECHO ENTRE A SE E OS TRAFOS T12 E TRECHO CH1
51T12A  CH1A               .0747        .538
52T12B  CH1B                .018        .143
53T12C  CH1C
C IMPEDÂNCIA ENTRE O TRECHO CH1 E TRAFO T3 (T3)
51CH1A  T3_1A               .677        .488
52CH1B  T3_1B               .017         .13
53CH1C  T3_1C
C IMPEDÂNCIA DO TRECHO ENTRE O TRAFO TP1 E CH3
51T3_1A TP1A               .0942        .679
52T3_1B TP1B                .023         .18
53T3_1C TP1C
C IMPEDÂNCIA ENTRE O TRAFO TP1 E CH3
51TP1A  CH3A                .149        1.08
52TP1B  CH3B                .037        .286
53TP1C  CH3C
C IMPEDÂNCIA ENTRE BC3 E OS TRAFO 4,5,6,7 (T45)
51CH3A  T45A               .0785        .568
52CH3B  T45B                .019        .149
53CH3C  T45C
C IMPEDÂNCIA ENTRE OS TRAFOS T45 E O TP2 (TP2)
51T45A  TP2A                .092        .663
52T45B  TP2B                .023        .178
53T45C  TP2C
C IMPEDÂNCIA ENTRE O TRAFO TP2 E O T13 (T13)
51TP2A  T13_1A             .0379        .273
52TP2B  T13_1B              .009        .072
53TP2C  T13_1C
C IMPEDÂNCIA DO TRECHO ENTRE T13 O OS TRAFOS 8,9,10 (T89)
51T13_1AT89A                .113        .817
52T13_1BT89B                .028        .215
53T13_1CT89C
C IMPEDÂNCIA ENTRE OS TRAFOS T89 E TP3 (TP3)
51T89A  TP3A                .027        .195
52T89B  TP3B                .007         .05
53T89C  TP3C
C IMPEDÂNCIA ENTRE OS TRAFOS T89 E OS TRAFOS 11,12,14 (T11)
51T11A  T89A                  .1        .407
52T11B  T89B                 .06        .119
53T11C  T89C

C IMPEDÂNCIA ENTRE OS TRAFOS T11 E O TP4 (TP4)
51T11A  TP4_1A                .1        .407
52T11B  TP4_1B               .06        .119
53T11C  TP4_1C
```

**c) Capacitância, Indutância e Resistência.**

```
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R  >< L  >< C  >
                            ↓     ↓     ↓
                                        Capacitância
                            Indutância
                            Resistência

C BANCO DE CAPACITOR 2 - BC2
  BC2A  NEUT2                          8.36                                0
  BC2B  NEUT2                          8.36                                0
  BC2C  NEUT2                          8.36                                0
C BANCO DE CAPACITOR 1 - BC1
  BC1A  NEUT1                         16.71                                0
  BC1B  NEUT1                         16.71                                0
  BC1C  NEUT1                         16.71                                0
C BANCO DE CAPACITOR 3 - BC3
  BC3A  NEUT3                          8.36                                0
  BC3B  NEUT3                          8.36                                0
  BC3C  NEUT3                          8.36                                0
C RESISTÊNCIAS INFINITAS PARA TERRA
  NEUT1                     1.E6                                           0
  NEUT2                     1.E6                                           0
  NEUT3                     1.E6                                           0
  NEUT4                       1.                                           0
  NEUT5                       1.                                           0
  NEUT6                       1.                                           0
  NEUT7                       1.                                           0
C CONJUNTO DE TRAFOS 1 E 2
  T12A                    2514. 2100.                                      0
  T12B                    2514. 2100.                                      0
  T12C                    2514. 2100.                                      0
C CONJUNTO DE TRAFOS 4,5,6 E 7
  T45A                    1137. 949.7                                      0
  T45B                    1137. 949.7                                      0
  T45C                    1137. 949.7                                      0
C CONJUNTO DE TRAFOS 8,9 E 10
  T89A                    3122. 2616.                                      0
  T89B                    3122. 2616.                                      0
  T89C                    3122. 2616.                                      0
C CONJUNTO DE TRAFOS 11,12 E 14
  T11A                    1500. 1253.                                      0
  T11B                    1500. 1253.                                      0
  T11C                    1500. 1253.                                      0
C TRAFO PARTICULAR 1 (3 TRAFOS)
  TP1A                                  15.                                0
  TP1B                                  15.                                0
  TP1C                                  15.                                0
  TP1A                    45.81 107.2                                      0
  TP1B                    45.81 107.2                                      0
  TP1C                    45.81 107.2                                      0
C TRAFO PARTICULAR 2 (4 TRAFOS)
  TP2A                    71.58 167.4                                      0
  TP2B                    71.58 167.4                                      0
  TP2C                    71.58 167.4                                      0
  TP2A                                  10.                                0
  TP2B                                  10.                                0
  TP2C                                  10.                                0
C TRAFO PARTICULAR 3  (2 TRAFOS)
  TP3A                    251.2 587.5                                      0
  TP3B                    251.2 587.5                                      0
  TP3C                    251.2 587.5                                      0
  TP3A                                   3.                                0
  TP3B                                   3.                                0
  TP3C                                   3.                                0
```

**d) Transformador saturável.**

```
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R  >< L  >< C  >
```

```
C TRANSFORMADOR DA SE - 138/13.8 KV - 25 MVA
C                          I0  corrente através do ramo magnetizante
                                 Fluxo no ramo magnetizante
                                           Rm  Resistência no magnetizante
C                     <       ><    ><    ><    >
  TRANSFORMER             3.019326.899SUB1A  6.3E4                          0
        Corrente        Fluxo
      A (pico)        V.S (pico)

      3.04585138      26.6654561
      7.68117963      29.6282846
      15.7373247       32.591113
      16373.2353      38.5167699
            9999
                            Resistência
                                Indutância
                                     Tensão
                          <  R ><  L ><  V >
 1BTA   NEUT4              .01751.5137 7.8981     Enrolamento Secundário
 2ATA   ATC               1.7462151.37  138.      Enrolamento Primário

  TRANSFORMER SUB1A                   SUB1B
 1BTB   NEUT4
 2ATB   ATA

  TRANSFORMER SUB1A                   SUB1C
 1BTC   NEUT4
 2ATC   ATB

C CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFO T3
  T3_2A                   1.4426 1.205                                       0
  T3_2B                   1.4426 1.205                                       0
  T3_2C                   1.4426 1.205                                       0

C TRAFO DE DISTRIBUIÇÃO DE 45 KVA - 13.2/0.22 KV - T3 (AMARELO)
  TRANSFORMER              .016435.712T3AA   6.3E4                          0
        0.016398        35.71255
        0.039992        40.17662
        0.069525        44.64069
        0.088701        46.87272
        0.112229        49.10476
        0.139368         51.3368
        0.174623        53.56883
        0.214978         58.0329
        0.374252        62.49697
            9999
 1T3_1A T3_1C             81.819143.53  13.2
 2T3_2A NEUT5              .0093 .0163  .127
  TRANSFORMER T3AA                    T3AB
 1T3_1B T3_1A
 2T3_2B NEUT5
  TRANSFORMER T3AA                    T3AC
 1T3_1C T3_1B
 2T3_2C NEUT5

C CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFO T13
  T13_2A                  2.4297 2.031                                       0
  T13_2B                  2.4297 2.031                                       0
  T13_2C                  2.4297 2.031                                       0

C MODELAGEM NOVA DO TRAFO DE DISTRIBUIÇÃO 13
  TRANSFORMER              .016435.712T13AA  6.3E4                          0
        0.016398        35.71255
        0.039992        40.17662
```

```
        0.069525        44.64069
        0.088701        46.87272
        0.112229        49.10476
        0.139368         51.3368
        0.174623        53.56883
        0.214978        55.80087
        0.261049         58.0329
            9999

1T13_1AT13_1C            81.819143.53  13.2
 2T13_2ANEUT6              .0093 .0163  .127
  TRANSFORMER T13AA                   T13AB
 1T13_1BT13_1A
 2T13_2BNEUT6
  TRANSFORMER T13AA                   T13AC
 1T13_1CT13_1B
 2T13_2CNEUT6

C TRAFO DE DISTRIBUIÇÃO 4 - 45 KVA - 13.2/0.22 KV
  TRANSFORMER              .016435.712T4AA   6.3E4                          0
        0.016398        35.71255
        0.039992        40.17662
        0.069525        44.64069
        0.088701        46.87272
        0.112229        49.10476
        0.139368         51.3368
        0.174623        53.56883
        0.214978        55.80087
        0.261049         58.0329
            9999

1TP4_1ATP4_1C            81.819143.53  13.2
 2TP4_2ANEUT7              .0093 .0163  .127
  TRANSFORMER T4AA                    T4AB
 1TP4_1BTP4_1A
 2TP4_2BNEUT7
  TRANSFORMER T4AA                    T4AC
 1TP4_1CTP4_1B
 2TP4_2CNEUT7

C CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFO T4
  TP4_2A                    .159   .18                                       0
  TP4_2B                    .159   .18                                       0
  TP4_2C                    .159   .18                                       0
  TP4_2A                              3343.                                  0
  TP4_2B                              3343.                                  0
  TP4_2C                              3343.                                  0

/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde ><   Ie   ><Vf/CLOP ><  type  >
  SEA   SE1A         61.      1.E3                                           0
C CHAVE (DISJUNTORES) DO ALIMENTADOR
  BTA   SEA          -1.      400.                                           1
  BTB   SEB          -1.      400.                                           1
  BTC   SEC          -1.      400.                                           1
C CHAVE DE COMANDO BC3
  BC3A  CH3A        400.      400.                                           0
  BC3B  CH3B        400.      400.                                           0
  BC3C  CH3C        400.      400.                                           0
C CHAVE DE COMANDO BC1
  BC1A  CH1A        400.      400.                                           0
  BC1B  CH1B        400.      400.                                           0
  BC1C  CH1C        400.      400.                                           0
C CHAVE DE COMANDO BC2
  BC2A  CH1A        400.      400.                                           0
  BC2B  CH1B        400.      400.                                           0
  BC2C  CH1C        400.      400.                                           0
```

**e) Fonte**

```
/SOURCE
             Valor de pico do sinal
                       Freqüência
                                Ângulo de fase

C < n 1><>< Ampl.  >< Freq.  ><Phase/T0><   A1   ><   T1   >< TSTART >< TSTOP  >
C FONTE EQUIVALENTE DO SISTEMA
14FONTA  0 112676.53       60.                                     -1.      400.
14FONTB  0 112676.53       60.     -120.                           -1.      400.
14FONTC  0 112676.53       60.      120.                           -1.      400.

/OUTPUT
  FONTA FONTB FONTC ATA   ATB   ATC   SE1A  SE1B  SE1C
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```