

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

SIDNEI PEREIRA

**TRANSFORMADA WAVELET APLICADA A ANÁLISE AUTOMÁTICA
DE OSCILOGRAFIAS DE CURTA DURAÇÃO EM UNIDADES
GERADORAS**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO

2016

SIDNEI PEREIRA

**TRANSFORMADA *WAVELET* APLICADA A ANÁLISE AUTOMÁTICA
DE OSCILOGRAFIAS DE CURTA DURAÇÃO EM UNIDADES
GERADORAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Moreto.
Co-orientador: Prof. Dr. Gustavo Weber
Denardin

PATO BRANCO

2016

P414t Pereira, Sidnei

Transformada *wavelet* aplicada a análise automática de oscilografias de curta duração em unidades geradoras / Sidnei Pereira -- 2016.

125f. il 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Miguel Moreto

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Weber Denardin

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pato Branco, 2016

Bibliografia: f. 120 – 125.

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Osciladores elétricos. 3. Wavelets (Matemática). 4. Transitórios (Eletricidade). I. Moreto, Miguel, orient. II. Denardin, Gustavo Weber, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD 22. ed. 621.3

Ficha catalográfica elaborada por

Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630

Biblioteca da UTFPR Câmpus Pato Branco



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Pato Branco
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação n° 043

Transformada *Wavelet* Aplicada à Análise Automática de Oscilografias de Curta Duração em Unidades Geradoras

por

Sidnei Pereira

Dissertação apresentada às dezesseis horas do dia trinta e um de março de dois mil e dezesseis, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (Área de Concentração: Sistemas e Processamento de Energia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Miguel Moreto
UFSC/SC (Orientador)

Prof. Dr. César Rafael Claire Torrico
UTFPR/PB

Prof. Dr. Flávio Antonio Becon Lemos
UFRGS/RS

Prof. Dr. Jean Patric da Costa
UTFPR/PB

Prof. Dr. Ricardo Vasques de Oliveira
Coordenador do PPGEE

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha esposa Juliane e meus pais Paulo e Tecla.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao amigo Miguel Moreto pelo incentivo na busca pela pós-graduação, pelo apoio e orientação no decorrer dos estudos, pela compreensão nos momentos de dificuldades pessoais;

Agradeço a minha esposa Juliane Dalponte Pereira pelo constante incentivo e companheirismo;

Aos meus pais Paulo e Tecla Pereira pela educação e exemplo de vida, que me tornaram um eterno aprendiz;

As concessionárias de energia que disponibilizaram dados para os estudos de caso, mesmo sem serem referenciadas ao longo do trabalho, pela necessidade de sigilo de tais dados;

Aos professores da banca pelas críticas e sugestões.

“Sempre faço o que não consigo fazer para aprender o que não sei. Se sabemos exatamente o que vamos fazer, para quê fazê-lo?”

Pablo Picasso

Pereira, Sidnei. Transformada *wavelet* aplicada a análise automática de oscilografias de curta duração em unidades geradoras. 2016. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

RESUMO

Este trabalho tem como foco de estudo a análise automática de registros de perturbações em unidades geradoras do sistema elétrico. Propõe-se um método, baseado na transformada *wavelet*, para aplicar aos registros de perturbações de curta duração (forma de onda) e detectar instantes de faltas em geradores, realizar a segmentação dos registros e extrair informações que caracterizem a falta. Como saída deste método, se obtém um conjunto de informações representativas dos sinais monitorados em unidades geradoras. Essas informações podem ser aplicadas a um sistema especialista voltado para a classificação de faltas e demais condições anormais de operação. O grande volume de dados, produzidos pelos registradores digitais de perturbações do sistema elétrico, justifica a pesquisa e a busca por métodos de análise automática que auxiliem o trabalho dos analistas em busca das causas das perturbações. A revisão bibliográfica apontou as possíveis aplicações para as oscilografias e o estado da arte dessas. A revisão conceitual do padrão COMTRADE e da transformada *wavelet* embasa a escolha do método adequado à solução do problema. Testes foram realizados para determinar a melhor *wavelet* mãe no processo de segmentação. O método proposto foi aplicado a cinco estudos de casos com registros de oscilografias reais e o resultado obtido confirmou a eficiência deste. Espera-se, com esta pesquisa, aperfeiçoar o processo de análise pós-operação de ocorrências no Sistema Interligado Nacional, tendo como resultado direto a redução no tempo de indisponibilidade de equipamentos, como geradores.

Palavras chave: Sistemas de potência, oscilografias, análise automática, detecção de faltas, segmentação.

Pereira, Sidnei. Wavelet transform applied automatic analysis of short oscillograms generating units. 2016. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

ABSTRACT

The focus of this work is the automatic analysis of disturbance records for electrical power generating units. The main proposition is a method based on wavelet transform applied to short-term disturbance records (waveform records). The goal of the method is to detect the time instants of recorded disturbances and extract meaningful information that characterize the faults. The result is a set of representative information of the monitored signals in power generators. This information can be further classified by an expert system (or other classification method) in order to classify the faults and other abnormal operating conditions. The large amount of data produced by digital fault recorders during faults justify the research of methods to assist the analysts in their task of analysing the disturbances. The literature review pointed out the state of the art and possible applications for oscillography records. The review of the COMTRADE standard and wavelet transform underlines the choice of the method for solving the problem. The conducted tests lead to the determination of the best mother wavelet for the segmentation process. The application of the proposed method to five case studies with real oscillographic records confirmed the accuracy and efficiency of the proposed scheme. With this research, the post-operation analysis of occurrences is improved and as a direct result is the reduction of the time that generators are offline.

Palavras chave: Power systems, oscillograms, automatic analysis, fault detection, segmentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Análise de oscilografia: visão geral.	16
Figura 2: Rede de coleta de registros.	21
Figura 3: Registrador Digital de Perturbações Multifunções RPV-310.	32
Figura 4: Exemplos de registro de oscilografia: arquivo de configuração (.cfg)	34
Figura 5: Exemplos de registro de oscilografia: arquivo de dados (.dat)	35
Figura 6: Exemplos de registro de curta duração.	37
Figura 7: Exemplos de registro de longa duração.	37
Figura 8: Exemplos de registro de sequência de eventos.	38
Figura 9: a) Sinal de tempo contínuo periódico. b) Decomposição feita pela FT em sinais de frequências fundamentais.	41
Figura 10: a) Sinal discreto no tempo. b) Magnitude dos fasores de frequências distintas que compõem o sinal discreto, obtidas a partir da DFT.	42
Figura 11: a) Sinal de registro de oscilografia. b) Frequências que compõem o sinal, obtidas a partir da FT.	43
Figura 12: Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT).....	43
Figura 13: a) Trecho de registro de oscilografia com perturbação. b) registro de oscilografia de curta duração. c) Plano tempo versus frequência, obtido pela STFT.	45
Figura 14: Resolução no plano tempo-frequência a) Obtido pela STFT b) Obtido pela WT.....	46
Figura 15: <i>Wavelet</i> de Haar.....	48
Figura 16: <i>Wavelet</i> Chapéu Mexicano.	49
Figura 17: <i>Wavelet</i> de Morlet.	49
Figura 18: <i>Wavelets</i> de Daubechies.....	50
Figura 19: Decomposição wavelet com filtros.	53
Figura 20: Exemplo de <i>downsample</i> . a) Sinal original. b) Sinal reamostrado.	53
Figura 21: Decomposição com banco de filtros.....	54
Figura 22: Decomposição por banco de filtros na forma de espaços vetoriais.	54
Figura 23: Árvore de decomposição <i>wavelet</i> até o quinto nível.	55
Figura 24: Visualização da magnitude dos coeficientes de detalhe por escala de cores.	56
Figura 25: Visualização da magnitude dos coeficientes de detalhe.	56
Figura 26: Fluxograma do método proposto: visão geral.	59
Figura 27: Variação da energia do coeficiente de detalhe cd3.....	61
Figura 28: Aumento brusco da energia do coeficiente de detalhe cd3: a) em todo o sinal; b) zoom no momento da falta.	63
Figura 29: Detalhe da segmentação	64
Figura 30: Transformada de Clarke-Concórdia.	66
Figura 31: Aplicação da transformada de Clarke-Concórdia.	67
Figura 32: Método proposto: detecção de transitórios e segmentação.	68

Figura 33: Método proposto: extração de características.....	72
Figura 34: Modelo de simulação.	75
Figura 35: Tela inicial do programa “analise_oscilo” desenvolvido.	76
Figura 36: Falta trifásica simulada com carregamento nominal.	77
Figura 37: Falta bifásica simulada com carregamento de 0,2 p.u..	79
Figura 38: Visualização das tensões e correntes da unidade geradora, caso 1.....	84
Figura 39: Detalhe da segmentação da tensão, caso 1.	85
Figura 40: Detalhe da segmentação da corrente, caso 1.....	86
Figura 41: Sinais segmentados, caso 1.	87
Figura 42: Análise das características extraídas em p.u.: caso 1.....	88
Figura 43: Visualização das correntes e tensões da unidade geradora, caso 2.	90
Figura 44: Detalhe da segmentação da tensão, caso 2.	91
Figura 45: Detalhe da segmentação da corrente, caso 2.....	92
Figura 46: Sinais segmentados, caso 2.	92
Figura 47: Sinais segmentados individualmente, caso 2.....	93
Figura 48: Análise das características extraídas em p.u.: caso 2.....	94
Figura 49: Visualização das correntes e tensões da unidade geradora, caso 3.	96
Figura 50: Detalhe da segmentação da tensão para transitório lento, caso 3.....	97
Figura 51: Detalhe da segmentação da corrente para transitório lento, caso 3.	98
Figura 52: Sinais segmentados para transitório lento, caso 3.	98
Figura 53: Sinais segmentados individualmente, caso 3.....	99
Figura 54: Análise das características extraídas em p.u.: caso 3.....	100
Figura 55: Visualização das correntes e tensões da unidade geradora, caso 4.	102
Figura 56: Detalhe da segmentação da tensão, vários transitórios, caso 4.	103
Figura 57: Detalhe da segmentação da corrente, vários transitórios, caso 4.....	104
Figura 58: Sinais segmentados para vários transitórios, caso 4.	104
Figura 59: Sinais segmentados individualmente, caso 4.....	105
Figura 60: Análise das características extraídas em p.u.: caso 4.....	106
Figura 61: Visualização das correntes e tensões da unidade geradora, caso 5.	109
Figura 62: Detalhe da segmentação da tensão, caso 5.	110
Figura 63: Detalhe da segmentação da corrente, caso 5.....	111
Figura 64: Sinais segmentados, caso 5.	111
Figura 65: Sinais segmentados individualmente, caso 5.....	112
Figura 66: Análise das características extraídas em p.u.: caso 5.....	113

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Publicações: objetivo da aplicação versus ferramenta utilizada.	30
Quadro 2: Famílias de <i>wavelets</i>	51
Quadro 3: Comparação segmentação com carga nominal.	78
Quadro 4: Comparação segmentação com carga 20%.	80
Quadro 5: Comparação segmentação com diferentes resistências de falta.	81
Quadro 6: Resultado da segmentação.	82
Quadro 7: Características da unidade geradora.	83
Quadro 8: Características extraídas em p.u.: caso 1.	88
Quadro 9: Características extraídas em p.u.: caso 2.	94
Quadro 10: Características extraídas em p.u.: caso 3.	100
Quadro 11: Características extraídas em p.u.: caso 4.	106
Quadro 12: Características extraídas em p.u.: caso 5.	113

LISTA DE SIGLAS

AMR	Análise multiresolução
Aneel	Agência nacional de energia elétrica
cd	Coeficiente de detalhe
Chesf	Companhia hidroelétrica do São Francisco
COMTRADE	<i>Common format for transient data exchange</i>
COS	Centros de operação dos sistemas
CWT	<i>Continuous wavelet transform</i> - Transformada <i>wavelet</i> contínua
db	Daubechies
DFT	<i>Discrete Fourier transform</i> - Transformada discreta de Fourier
DSP	<i>Digital signal processor</i> - Processador digital de sinais
DWT	<i>Discrete wavelet transform</i> - Transformada <i>wavelet</i> discreta
FFT	<i>Fast Fourier transform</i> - Transformada rápida de Fourier
FT	<i>Fourier Transform</i> - Transformada de Fourier
GPS	Sistema de posicionamento global
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LT	Linha de transmissão
ONS	Operador nacional do sistema
PDS	Processamento digital de sinais
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i> - Unidades de Medida Fasorial
PRODIST	Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional
pu	Por unidade
QEE	Qualidade da energia elétrica
RAP	Relatório de análise de perturbação
RDP	Registrador digital de perturbação
RNA	Redes neurais artificiais
SE	Sistema especialista
SEP	Sistema elétrico de potência
SIN	Sistema interligado nacional
SOE	<i>Sequence of events</i> - Sequências de Eventos
STFT	<i>Short time Fourier transform</i> - Transformada de Fourier de tempo curto
TPC	Transformador de potencial capacitivo
WT	<i>Wavelet transform</i> - Transformada <i>wavelet</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3 JUSTIFICATIVA	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2. ESTADO DA ARTE DA ANÁLISE DE OSCILOGRAFIAS	20
2.1 ANÁLISES DA QUALIDADE DE ENERGIA	22
2.2 DIAGNÓSTICOS DE EQUIPAMENTOS	23
2.3 DIAGNÓSTICOS DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO	24
2.4 LOCALIZAÇÕES DE FALTAS	25
2.5 DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS	26
2.5.1 Detecção de faltas	27
2.5.2 Classificação das faltas	28
2.6 FERRAMENTAS UTILIZADAS NA EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES	29
3. ASPECTOS GERAIS DE OSCILOGRAFIAS E TRANSFORMADA WAVELET ..	31
3.1 OSCILOGRAFIAS	31
3.1.1 Registro de curta duração	36
3.1.2 Registro de longa duração	37
3.1.3 Sequência de eventos	38
3.2 FUNDAMENTOS DA TRANSFORMADA WAVELET	39
3.2.1 Por que wavelets	39
3.2.2 A transformada wavelet contínua - CWT	46
3.2.3 A transformada wavelet discreta - DWT	51
3.2.4 Análise multiresolução - AMR	52
3.2.5 Aplicação	55

4. MÉTODO PROPOSTO: DETECÇÃO E SEGMENTAÇÃO	58
4.1 VISÃO GERAL	58
4.2 DETECÇÃO DAS FALTAS E SEGMENTAÇÃO DOS REGISTROS.....	59
4.3 EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS	69
4.4 CLASSIFICAÇÃO.....	73
5. AVALIAÇÃO DA WAVELET MÃE	74
5.1 MODELO DE SIMULAÇÃO.....	74
5.2 ALGORITMO DE TESTES	76
5.3 CARREGAMENTO NOMINAL	77
5.4 CARREGAMENTO REDUZIDO	79
5.5 RESISTÊNCIA DE FALTA	80
5.6 DEFINIÇÃO DA WAVELET MÃE	81
6. RESULTADOS	83
6.1 CASO 1: DESLIGAMENTO FORÇADO POR CURTO-CIRCUITO	83
6.2 CASO 2: DESLIGAMENTO DO GERADOR POR PERDA DE EXCITAÇÃO.....	90
6.3 CASO 3: DESENERGIZAÇÃO POR REVERSÃO DE POTÊNCIA.....	96
6.4 CASO 4: DEFEITO EM DISJUNTOR (VÁRIOS TRANSITÓRIOS)	102
6.5 CASO 5: CONEXÃO AO SIN SEM CONDIÇÕES DE SINCRONISMO	109
6.6 ANÁLISES QUALITATIVAS E QUANTITATIVAS	115
7. CONCLUSÕES	118
REFERÊNCIAS	120

1. INTRODUÇÃO

Os geradores, transformadores e linhas de transmissão são componentes essenciais em um Sistema Elétrico de Potência (SEP). Desta forma, o monitoramento desses equipamentos deve ser constante para assegurar sua correta operação, o contínuo fornecimento de energia e minimizar os custos decorrentes de uma eventual parada. Atualmente, além dos tradicionais e diversos dispositivos de proteção, os equipamentos do Sistema Interligado Nacional (SIN) são monitorados por Registradores Digitais de Perturbação (RDP), conhecidos também como oscilógrafos digitais. Esses equipamentos monitoram constantemente grandezas predefinidas do SEP, como por exemplo, as tensões, correntes e frequência, bem como os estados de dispositivos de proteção, chaves seccionadoras e disjuntores. Caso ocorra alguma variação nesses sinais que ultrapasse um limiar pré-estabelecido, ou caso ocorra atuação de funções de proteção ou chaveamentos, o equipamento cria um registro que pode ser acessado posteriormente (VARELA et al., 2009).

Um registro de oscilografia é composto por um conjunto de dados digitais dispostos em um formato padronizado pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) e nomeado de COMTRADE (*Common Format for Transient Data Exchange*). O padrão IEEE COMTRADE define um formato comum para os arquivos de dados digitais e assim um meio para intercâmbio de informações.

Para Davila (2010) pode-se comparar a importância do uso de RDPs no SIN com a importância da "caixa preta" em aviões. A caixa preta é destinada a gravar dados extremamente importantes para a investigação de eventos críticos, como acidentes. Da mesma forma no sistema elétrico, em um cenário de falta e perturbação ou apagão, é preciso uma caixa preta que registre informações para uma análise posterior e possibilite identificar a causa do distúrbio, função que é desempenhada pelos RDPs (DAVILA, 2010). Porém no caso dos aviões os dados da caixa preta são acessados somente após graves acidentes e são analisados os últimos dados registrados a fim de elucidar o fato. Já no sistema elétrico os RDPs são ajustados com tal sensibilidade que garanta o registro de qualquer anormalidade no sistema, mesmo que esta não seja suficiente para produzir um blecaute de grandes proporções. Assim a quantidade de informações registradas pelos RDPs é

muito maior, produzindo uma demanda de trabalho para análise manual que por vezes a torna inviável (MORETO e ROLIM, 2010).

A maioria dos RDPs atuais possui conexão para sincronismo temporal com Sistema de Posicionamento Global (GPS). Com isso os sinais amostrados são sincronizados em uma base de tempo absoluta, possibilitando a correlação de registros de diferentes RDPs. A existência de interfaces de comunicação nestes equipamentos permite que todos os registros oscilográficos sejam concentrados em um centro de operação e análise. Estes sistemas são chamados de redes de oscilografia e são regulamentados pelos procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (ONS, 2011).

Em todo o processo de análise dos registros de oscilografias, o tempo de coleta dos dados e filtragem dos registros relevantes pode durar algumas horas (GIOVANINI et al., 2008). Somado a isto está o fato de que diversas ocorrências podem ser registradas por dia em uma empresa de geração ou transmissão de energia, sendo a maioria correspondente a procedimentos operativos normais, como energização e desenergização de geradores.

Como o tempo despendido nas análises é crucial para a diminuição dos custos decorrentes da parada de um equipamento, é evidente a necessidade de uma metodologia capaz de gerar um diagnóstico da perturbação de forma automática, apontando para uma possível causa do problema e possibilitando priorizar a atenção do engenheiro especialista aos casos mais importantes. Dessa forma, o processo de análise de ocorrências se torna mais ágil e reduz-se o tempo em que o gerador permanece fora de serviço (MORETO e ROLIM, 2010). Segundo Moreto (2011) dados experimentais demonstram que aproximadamente 95% dos registros de oscilografias em unidades geradoras podem ser automaticamente arquivados, uma vez que são decorrentes de procedimentos operativos normais (MORETO, 2011).

Os registros oscilográficos produzidos pelos RDPs podem ser utilizados para diversas finalidades (MORETO e ROLIM, 2010). Entre elas as principais são:

- Classificação de faltas – determinação do tipo da falta, como fase-terra ou fase-fase, trifásica, rompimento de condutor. Desligamentos forçado de geradores por perda de excitação, falha na reversão de potência, curto-circuito, erro de sincronismo, etc.;

- Localização da falta – cálculo da distância da falta a partir da extremidade monitorada para linhas de transmissão, falta interna ou externa para o caso de geradores e transformadores;
- Diagnóstico de equipamentos – monitorar o funcionamento de dispositivos de manobra como disjuntores ou de equipamentos como transformadores de instrumentos (transformador de corrente, transformador de potencial, para-raios);
- Análise de desempenho de proteção – verificar a correta atuação das funções de proteção, verificar se houve coordenação na atuação da proteção de diferentes circuitos para uma mesma falta;
- Análise de qualidade de energia – variação de tensão, variação de frequências, presença de frequências harmônicas.

O procedimento para análise de um registro de oscilografia pode ser dividido em etapas, conforme mostra a Figura 1. Em um primeiro momento busca-se arquivar registros de operações normais oriundos de manobras na operação do SIN.

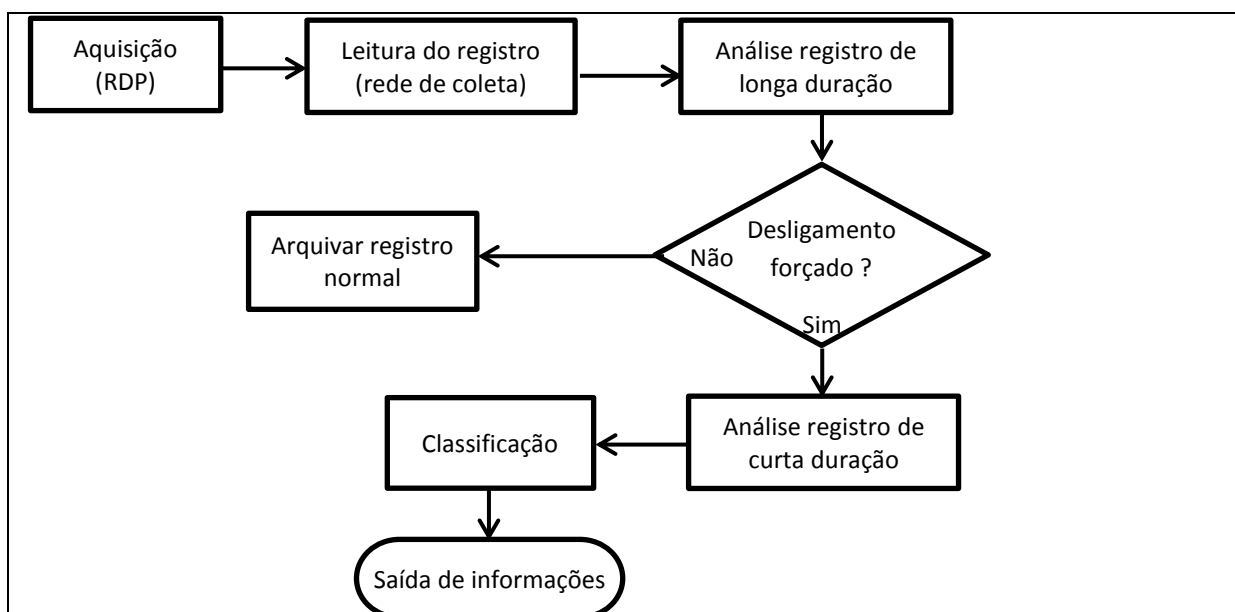


Figura 1: Análise de oscilografia: visão geral.
Fonte: Autoria própria.

Quando a análise do registro de longa duração aponta para a ocorrência de um desligamento forçado busca-se aprofundar a análise através do registro de curta duração. O desenvolvimento de um sistema de análise automática de oscilografias deve levar em consideração o objetivo para o qual a análise será direcionada. A finalidade da análise determina os dados do registro de oscilografia que a serem utilizados como entrada do sistema (registro de curta duração, registro

fasorial, sequência de eventos). Por exemplo, se o objetivo é o diagnóstico da atuação do disjuntor será necessário o uso da sequência de eventos para verificar quanto tempo após a atuação da proteção ocorreu a abertura do disjuntor e eliminação do defeito.

Antes de um sistema conseguir classificar uma ocorrência faz-se necessário a extração de características dos registros. Características são extraídas tanto do registro de longa duração como de curta duração. Esta etapa utiliza ferramentas matemáticas para transformar as variações numéricas nos dados registrados em informações que possam ser comparadas com padrões de causas já conhecidas, conseguindo assim classificar a origem da perturbação.

Porém para que as características extraídas contenham informações relevantes da ocorrência é necessário fazer uma divisão do registro em pedaços ou segmentos, como segmento pré falta, durante a falta e pós falta. Assim cada segmento conterá um conjunto de características a serem usadas na etapa de classificação. Para realizar esta segmentação de forma automática ferramentas matemáticas são empregadas para detectar os instantes de ocorrência de transitórios.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da dissertação é propor um método de análise de registros de perturbações com uso da transformada *wavelet* na detecção de transitórios e segmentação dos registros para extração de características dos sinais monitorados. A finalidade da análise é o diagnóstico das faltas em sistemas de geração e os dados de entrada são os registros de oscilografia de curta duração dos RDPs.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral algumas etapas foram vencidas, as quais podem ser consideradas como objetivos específicos, sendo os principais:

- Revisão bibliográfica para assimilar conceitos matemáticos da transformada *wavelet*, bem como levantar o estado da arte quanto a aplicação deste método no processamento digital de sinais;
- Definido as características a serem extraídas dos registros para serem posteriormente processadas por um sistema especialista de classificação de faltas;
- Desenvolvido método para processar os registros de oscilografia, capaz de detectar transitório e segmentar o registro em partes pré falta, durante a falta e pós falta;
- Testado o método proposto com dados de registros reais de oscilografias e simulações;
- Comparado resultados da segmentação com diferentes *wavelet* mãe e avaliado qual a mais adequada;

1.3 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema foi motivada pelo alto grau de relevância que este tem para a análise de ocorrências no SIN, tendo impacto direto na redução dos custos decorrentes de parada de equipamentos e otimizando o processo de análise manual de oscilografias.

O grande volume de oscilografias disponibilizadas pelos RDPs justifica a pesquisa e a busca por métodos de análise automática que auxiliem no trabalho dos analistas dos agentes do setor elétrico (MORETO e ROLIM, 2010). A característica de comunicação em rede dos RDPs e a consequente centralização dos seus dados vão ao encontro do desenvolvimento de uma ferramenta para análise automática ou mesmo um filtro capaz de pré-selecionar os dados, de forma a direcionar a atenção dos analistas aos dados mais importantes.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 desta dissertação faz uma revisão bibliográfica buscando levantar as aplicações e as técnicas que têm sido utilizadas na análise de oscilografias do SEP. Na sequência, o capítulo 3 aborda alguns conceitos fundamentais divididos em dois tópicos: o primeiro sobre oscilografias, explicando as redes de registradores de perturbação e o padrão COMTRADE; o segundo sobre transformada *wavelet*, ferramenta matemática amplamente utilizada na análise de oscilografias, descrevendo-a nas formas contínua, discreta e sua implementação. No capítulo 4 é explicada a metodologia proposta neste trabalho. O capítulo 5 mostra os resultados de testes para identificar a melhor *wavelet* mãe a ser utilizada e quantos níveis de decomposição, para sinais de oscilografias contendo registros de faltas em unidades geradoras. No capítulo 6 são mostrados os resultados dos estudos de caso aplicando a metodologia proposta na análise de oscilografias, com registros de ocorrências reais em unidades geradoras. Por fim o capítulo 7 faz algumas considerações finais, expõe as conclusões da pesquisa e propõem trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE DA ANÁLISE DE OSCILOGRAFIAS

A análise das ocorrências e perturbações no SIN implica diretamente na segurança operacional do sistema e está relacionada com a qualidade dos serviços de energia elétrica. Por qualidade dos serviços entenda-se continuidade, confiabilidade, tempo de restabelecimento em casos de blecaute e outros. Essa responsabilidade é dos agentes de operação do setor elétrico e do ONS, de acordo com o definido pela Resolução Normativa Aneel nº 115, de 29 de novembro de 2004 (ANEEL).

As análises de ocorrências e perturbações proveem subsídios fundamentais para identificar as causas e consequências, para avaliar e especificar equipamentos de proteção, como relés e disjuntores, para o diagnóstico de equipamentos e classificação dos distúrbios, entre outras aplicações. Desta forma, como descrito por Perez e Rincon (2012), medidas corretivas e preventivas podem ser tomadas, resultando em melhorias no desempenho do sistema elétrico e da qualidade dos serviços públicos de energia elétrica (PEREZ e RINCON, 2012).

De acordo com Pereira e Moreto (2013) a operação do SIN é organizada em três etapas temporais, sendo elas: pré-operação; operação em tempo real; e pós-operação. Dentre estas a pós-operação é a responsável pela análise posterior de todos os eventos com relevância que tenham ocorrido durante a etapa de operação em tempo real. Consideram-se eventos com relevância todos aqueles que não tenham sido previstos durante a etapa de pré-operação, incluindo perturbações, oscilações, faltas e outros (PEREIRA e MORETO, 2013). A rápida análise dos eventos, pela pós-operação, é de suma importância para diagnosticar a sua causa, permitindo agir sobre um possível defeito, minimizando a indisponibilidade de equipamentos ao SEP.

Para que seja possível a realização das análises pelos setores de pós-operação das concessionárias de energia é fundamental a existência de registros das medições do SEP. Para isto são instalados oscilógrafos nas usinas e subestações do sistema elétrico de potência. Os oscilógrafos monitoram e registram as principais grandezas elétricas analógicas, como tensões e correntes, e estados digitais como disjuntores (aberto/fechado) e proteções (atuado/normal). Os atuais oscilógrafos baseiam-se em tecnologia digital, sendo que passaram a ser

conhecidos por RDPs. (MORETO e ROLIM, 2010) (DAVILA, 2010) (PEREIRA e SPRITZER, 2007).

No atual modelo de operação do SIN o ONS desempenha a função de ditar as regras que os agentes do setor devem se submeter. Dentre essas regras, que são denominadas Procedimentos de Rede, encontra-se o Submódulo 11.6 que trata dos registros de perturbações. Esse submódulo atribui aos agentes a responsabilidade de implantar um sistema de coleta de dados provenientes dos RDPs (ONS, 2009). Como os RDPs são dispositivos digitais essa coleta se dá através de uma rede de comunicação que permite acesso remoto aos dados e interliga os RDPs a um servidor remoto que centraliza as informações em um único local, como exemplifica a Figura 2.

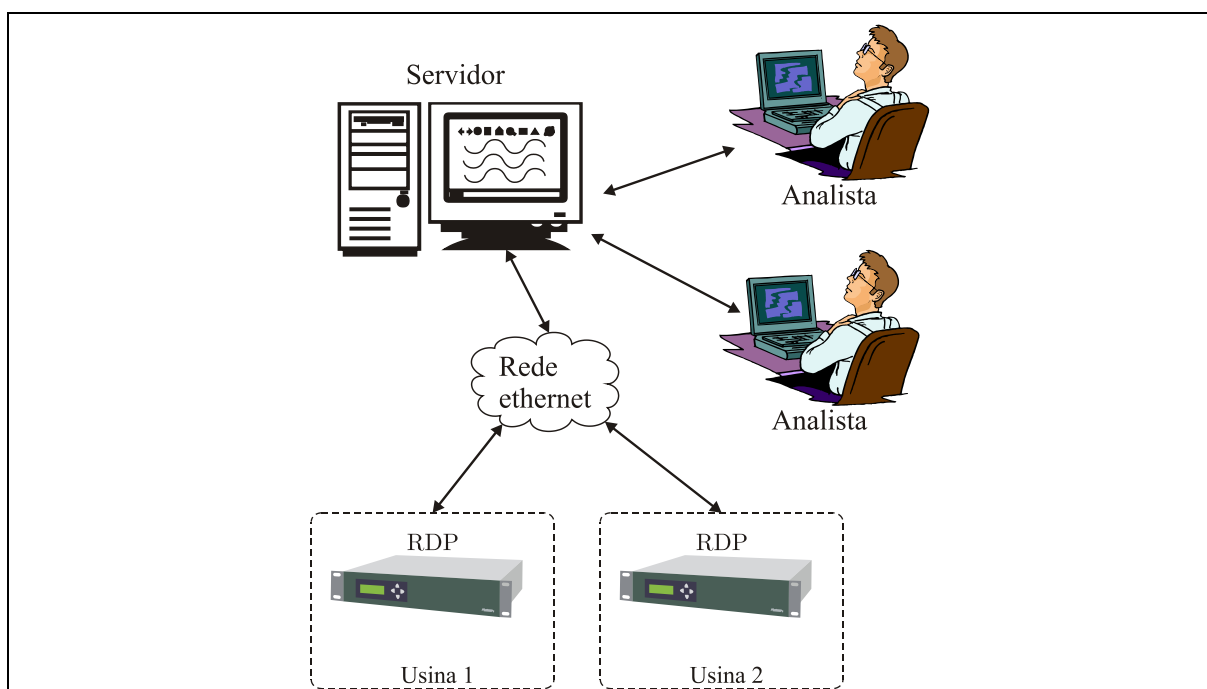


Figura 2: Rede de coleta de registros.
Fonte: (MORETO e ROLIM, 2010)

É perceptível que essa rede de RDPs concentra e disponibiliza uma grande quantidade de dados aos analistas responsáveis por sua análise, gerando uma alta demanda de trabalho. Considerando que os oscilógrafos ou RDPs produzem registros dos sinais monitorados em formato digital torna-se possível o emprego de métodos computacionais para promover a análise destes registros. O próprio submódulo 11.6 do ONS recomenda aos agentes:

"É permitida a utilização de filtros automáticos, instalados no agente de transmissão, para descarte de registros ocasionados por partidas programadas dos RDP, para a verificação da condição de operação e calibração desses registradores ou para a eliminação de partidas espúrias, tais como as decorrentes de manobras de seccionadoras." (ONS, 2009).

Nesse contexto alguns métodos têm sido propostos, utilizando diferentes técnicas e ferramentas computacionais, para realizar a análise de forma automática dos registros dos RDPs. Lenz (2009) descreve o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para avaliar o desempenho de relés de proteção usando os dados dos RDPs e das Sequências de Eventos (SOE), produzidas pelos sistemas de supervisão e controle. Costa (2010) propôs uma técnica de diagnóstico de distúrbios transitórios no sistema de transmissão baseada na transformada *wavelet* para aplicação integrada ao desenvolvimento de novos RDPs. Moreto (2011) desenvolveu um sistema de análise automática para registros digitais de longa duração de perturbações em unidades geradoras usando limiares exatos para classificar as causas dos eventos e descartar registros espúrios.

As oscilografias constituem os principais dados de entrada para as análises de ocorrências e perturbações, sendo o seu registro considerado pelo ONS como documento oficial para o Relatório de Análise de Perturbação (RAP) (ONS, 2009). Através da análise de oscilografias é possível extrair informações úteis para diversas aplicações, voltadas tanto para sistemas de geração como transmissão e distribuição de energia elétrica. Os tópicos seguintes fazem uma breve revisão sobre alguns campos de pesquisa aonde o uso das oscilografias vem sendo estudado, mostrando assim o estado da arte para análise de ocorrências do SEP.

2.1 ANÁLISES DA QUALIDADE DE ENERGIA

A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) define através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) os critérios de qualidade mínimos que os consumidores de energia elétrica têm direito. Especificamente no módulo 8 do PRODIST estão caracterizados os fenômenos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE), os critérios de amostragem, os valores de referência e os procedimentos relativos à qualidade do produto e do serviço (ANEEL, 2008).

Conforme o PRODIST são considerados aspectos da QEE em regime permanente ou transitório:

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Harmônicos;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Variação de frequência.

As informações de todos os fenômenos acima citados podem ser extraídas de uma oscilografia de curta duração. Fica assim explícito a aplicação das oscilografias na análise da QEE, seja por parte dos consumidores ou dos agentes de fornecedores de energia (geração, transmissão e distribuição). Kezunovic (2001) propôs a viabilidade da automatização da análise de distúrbios de qualidade de energia com uso de técnicas de processamento de sinais aliadas a ferramentas de inteligência artificial. A extração de propriedades dos sinais com uso de transformada de Fourier permitiria avaliar os parâmetros de qualidade de energia (KEZUNOVIC e LIAO, 2001). Costa (2011) apresentou uma ferramenta baseada em *wavelet* para detecção de distúrbios da qualidade de energia. As características da perturbação podem ser identificadas por meio dos seus coeficientes de *wavelet* (COSTA et al., 2011).

2.2 DIAGNÓSTICOS DE EQUIPAMENTOS

Monitorar o funcionamento de dispositivos de manobra, como disjuntores, ou de equipamentos como transformadores de instrumentos (transformador de corrente, transformador de potencial, para-raios) é uma constante necessidade nos departamentos de manutenção dos agentes do setor elétrico.

Através da análise de uma oscilografia é possível, por exemplo, determinar se o tempo de abertura de um disjuntor encontra-se dentro do especificado pelo fabricante. Este tipo de equipamento mecânico de manobra sofre desgaste natural de seus componentes e definir o momento certo para realizar a

manutenção preventiva é crucial para o sistema elétrico. Também é possível determinar tempos de restabelecimento de um para-raios após a ocorrência de uma descarga atmosférica e verificar se o mesmo não apresenta corrente de fuga acima da nominal. Diversas outras características de equipamentos podem ser identificadas em uma oscilografia, como nível de saturação em transformadores de corrente, corrente de *inrush* de transformadores, reatores e banco de capacitores. O emprego da transformada *wavelet* permite direcionar a análise na busca da causa primária de um defeito, identificando, por exemplo, ruídos de frequências características de dano em contato de disjuntor. (MORETO e ROLIM, 2010).

Um sistema de monitoramento de disjuntor, para auxiliar na manutenção preditiva, foi proposto por Silva (2005). A transformada de Fourier foi usada para acompanhar a componente de frequência fundamental das correntes e tensões e a transformada *wavelet* para detectar o instante de interrupção da corrente e assim determinar o tempo de abertura do disjuntor (SILVA, 2005).

Lachman (2007) propôs e implementou uma rotina computacional aplicando filtro de Fourier sobre registros de oscilografia para monitorar o funcionamento de Transformadores de Potencial Capacitivos (TPCs) instalados em subestações (LACHMAN, 2007).

2.3 DIAGNÓSTICOS DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO

Os requisitos básicos para um sistema de proteção são (ANDERSON, 1998):

- Confiabilidade - habilidade da proteção em atuar corretamente quando necessário e evitar atuações desnecessárias;
- Seletividade - capacidade da proteção em interromper apenas os disjuntores mais próximos da falta;
- Velocidade - rapidez com que a proteção localiza e elimina um defeito;
- Sensibilidade - capacidade da proteção em atuar sob mínimas condições de falta dentro da sua zona de proteção, sem perder a confiabilidade.

Essas características dos sistemas de proteção podem ser monitoradas através das oscilografias. A velocidade pode ser verificada pelos tempos de atuação.

A seletividade pela eliminação do defeito interrompendo somente os circuitos envolvidos na falta. A sensibilidade pela verificação dos limiares de atuação pré-ajustados nos relés de proteção e a confiabilidade pela verificação da real necessidade da atuação quando esta ocorrer (CARDOSO, 2013).

Lens (2009) implementou um programa computacional que relaciona os dados extraídos das oscilografias com as sequências de eventos dos sistemas de supervisão. A ferramenta proposta avalia o desempenho dos relés de proteção após uma ocorrência apoiando o especialista em análise de proteção (LENZ e ROLIM, 2009).

2.4 LOCALIZAÇÕES DE FALTAS

Os sistemas elétricos devem oferecer alto grau de continuidade no fornecimento de energia. Porém, interrupções nos serviços de energia elétrica podem ser provocadas pela ocorrência de diferentes tipos de fenômenos eletromagnéticos que podem afetar distintas classes de consumidores. Perturbações podem ocorrer em diversos componentes de um SEP, dentre os quais se destacam as Linhas de Transmissão (LTs) como o elemento mais susceptível, especialmente devido as suas dimensões físicas, complexidade funcional e ao ambiente em que se encontram, o que traz mais dificuldades para manutenção e monitoramento (SILVA, OLESKOVICZ e COURRY, 2005).

As decisões mais importantes sobre a operação do SEP são tomadas nos Centros de Operação dos Sistemas (COS), onde em tempo real informações sobre o estado dos equipamentos são recebidas por operadores. Esses são o elo final de uma prolongada cadeia de operação e têm como função realizar rápidas análises de ocorrências, buscando minimizar o tempo de restabelecimento das condições normais dos serviços de energia elétrica. Neste contexto ferramentas que indiquem a localização, mesmo que aproximada, de uma falta em uma LT, aceleram os procedimentos de manutenção. Equipes de campo especializadas podem ser acionadas e encaminhadas diretamente ao local da perturbação no sistema, reduzindo o tempo de deslocamento (FARIA et al., 2009).

Os dados registrados pelos RDPs, aliados ao conhecimento de características de uma LT, permitem a implementação de técnicas para cálculo e determinação da provável localização da falta. O trabalho de Silva (2005) apresentou uma aplicação da transformada *wavelet* para analisar os transitórios de alta frequência em um sistema de transmissão gerados por uma situação de falta, tendo como principal objetivo, a determinação do ponto de ocorrência da mesma (SILVA, OLESKOVICZ e COURY, 2005).

Os mais modernos RDPs já têm disponíveis para o usuário funções de localização de falta baseadas na teoria de ondas viajantes. Em função do tempo de propagação do sinal entre o ponto de falta e os terminais da linha, a localização da falta é estimada. Este é o caso do RPV-310 da Reason Tecnologia S.A. conforme descreve seu manual no tópico sobre suas características:

“Preparado para receber o módulo de localização de faltas por ondas viajantes. Tecnologia que permite a localização de faltas com a precisão de 300 metros em linhas de transmissão / distribuição de energia, independente do comprimento da linha” (REASON, 2010).

2.5 DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS

Dentre todas as possíveis aplicações para as oscilografias, uma delas se destaca. É a busca por determinar a causa primária ou tipo de falta que ocorreu no SEP, ou simplesmente a classificação da falta. A principal motivação para esta aplicação se deve às características dos SEPs, que estão sujeitos a uma grande gama de defeitos de difícil determinação pelas equipes de operação em tempo real dos COSs. Assim quando perturbações ocorrem e causam desligamento de funções do sistema, como geradores ou LTs, e suas causas não são facilmente detectadas, cabe aos analistas de oscilografia indicar ao menos uma provável origem do defeito, para que as equipes de campo tenham um ponto de partida no processo de manutenção.

Esse processo pós-operação de análise de oscilografias, geralmente dispõem de uma rede de coleta de oscilografias, que pode acessar todos os RDPs de um agente do SIN, conforme mostrado na Figura 2 (MORETO e ROLIM, 2010).

Esse processo centralizado de análise de oscilografias pode ser dividido em duas etapas, ambas com sua importância, sendo elas explicitadas nos dois tópicos seguintes.

2.5.1 Detecção de faltas

A lógica de funcionamento dos RDPs consiste no ajuste de condições de *trigger*. Essas condições quando atendidas dão início ao processo de gravação de um registro de oscilografia. Os *triggers* nada mais são do que limiares fixos para os canais analógicos monitorados e/ou mudança de estado para os canais digitais. Por exemplo, pode-se configurar que se o valor de um canal de tensão chegar a 0,9 pu dispare o processo de gravação. Em um canal digital o *trigger* pode representar a atuação de uma proteção. Essa lógica é muito eficiente e permite uma ótima correlação entre os dados de diferentes RDPs, por exemplo, instalados nos dois extremos de uma LT. (MORETO e ROLIM, 2010).

O inconveniente é que uma única perturbação pode gerar o disparo de diversos RDPs no SEP, gerando registros em todos eles. Muitas ocorrências que estão relacionadas apenas com fenômenos de QEE podem atingir os limiares de ajuste de *trigger* e produzir registros de oscilografia não relacionados a uma falta. Também ocorre disparo de *trigger* devidos a manobras no SEP ou ensaios em equipamentos durante manutenções preventivas.

A etapa de análise de oscilografias com objetivo de detecção de faltas consiste em uma análise menos aprofundada dos registros, que tem por objetivo principal fazer uma triagem dos registros. Após a triagem dois grupos de registros são separados, um dos que não representam faltas reais no sistema e outro que contem informações de faltas no sistema. Assim os registros relacionados a perturbações no SEP serão objeto de estudo mais minucioso enquanto os demais podem ser arquivados. O trabalho de Moreto (2011) buscou desenvolver uma metodologia capaz de arquivar automaticamente os registros de ocorrências que não necessitam de análise detalhada através da análise das oscilografias de longa duração (MORETO, 2011). A Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) mostrou sua contribuição com o desenvolvimento de um software responsável pela triagem dos registros oscilográficos de seu sistema de transmissão de energia (BRITO, SOUZA e COSTA, 2010).

O uso de Unidades de Medida Fasorial (PMUs - *Phasor Measurement Unit*) também tem sido estudado para a detecção de faltas (LIN, LIU e YU, 2002). As informações providas pelas PMUs consistem em registro de fasores de tensão e corrente. Esta mesma informação consta no registro de oscilografia, o qual dispõe de mais informações e pode ter uma maior taxa de amostragem. O uso de PMUs para localização de faltas em sistemas de transmissão tem sido estudado e se baseia no cruzamento de dados de diferente localização geográfica, realizando assim uma triangulação das informações com base de tempo absolutas, e estimando o local da ocorrência. (YIN e FAN, 2010) . Um ponto negativo ao uso das PMU é que normalmente estas se encontram instaladas em unidades consumidoras, após o sistema de distribuição. Isto as torna susceptível as variações de QEE do sistema de distribuição, como afundamentos de tensão ocasionados pela entrada aleatória de carga, desequilíbrio de carga entre fases, harmônicas de chaveamento de cargas, etc.. A tendência de baixo custo das PMUs as tornam atrativas para aplicações de *smart grid* no monitoramento das redes de distribuição (GRANDO et al., 2015). Os dados das PMUs são aplicados em algoritmos de monitoramento de estabilidade, dinâmicas em tempo real, estimação de estados, em sistemas elétricos de grande abrangência geográfica. Não foram encontrados estudos de uso das PMUs aplicados diretamente a sistemas de geração.

2.5.2 Classificação das faltas

Na etapa posterior à triagem dos registros, busca-se fazer a classificação das faltas. Esta análise tipicamente faz uso dos registros de curta-duração, ou registros de forma de onda, que possuem alta taxa de amostragem. Faz-se necessário recorrer a técnicas de processamento de sinais mais avançadas para auxiliar nessa tarefa, com o objetivo de automatizar o diagnóstico sobre os tipos de distúrbio presentes nos sinais registrados. A transformada *wavelet* constitui-se em uma ferramenta matemática bastante eficaz na análise de sinais de tensão ou corrente, obtidos durante a ocorrência de distúrbios na rede elétrica (CÂNDIDO, MEDEIROS JR. e OLIVEIRA, 2009). Também se pode estimar o tempo/instantes das mudanças nos parâmetros do sinal registrado, segmentando-o em pré falta, durante a condição de falta e pós falta. Após a segmentação do sinal em secções, o

processamento e análise do sinal podem ser realizados nestes segmentos (UKIL e ZIVANOVIC, 2007).

A classificação pode indicar o tipo do defeito a que o SEP foi submetido. Para Meneses e Rocha (2009) as faltas em LTs podem ser classificadas como: curto-circuito fase-fase, trifásico ou fase-terra, rompimento de condutor, queimada, descarga atmosférica e outros (MENESES e ROCHA, 2009). O trabalho de Costa (2010) propôs um método de diagnóstico de distúrbios transitórios no sistema de transmissão. Este método é baseado na análise em tempo real de variação da energia dos coeficientes *wavelet* das tensões e correntes em sistemas elétricos de transmissão de energia. O método é capaz de detectar os principais distúrbios com transitórios, tais como faltas, faltas evolutivas, afundamentos de tensão e transitórios devido às manobras de chaveamento em sistemas de transmissão e disparar um RDP, porém não diferencia a causa do distúrbio, ou seja, não faz a classificação (COSTA, 2010). Já o trabalho de Moreto (2011) apresentou uma metodologia baseada em filtros de Kalman para análise automática de perturbações em unidades de geração de energia com objetivo de fornecer uma estimativa da causa das faltas com base nos registros de longa duração ou fasorial. Em suas considerações finais Moreto (2011) sugere avaliar o desempenho de outras técnicas de processamento digital de sinais na etapa de segmentação dos registros de curta duração. Ukil e Zivanovic (2007) propuseram o “*universal threshold*” como método de detecção de faltas baseado na estatística do sinal em análise.

2.6 FERRAMENTAS UTILIZADAS NA EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES

A extração das informações dos registros de oscilografia consiste em um problema típico de Processamento Digital de Sinais (PDS) e como tal é tratado por meio de ferramentas matemáticas. Cada ferramenta é mais adequada a um tipo específico de sinal, portanto o conhecimento dos dados se faz necessário antes da escolha por qual ferramenta utilizar, bem como a definição de quais as informações a serem extraídas dos dados. A evolução e adaptação de métodos matemáticos aplicados a sinais contínuos no tempo para representar sinais amostrados tem ocorrido de maneira rápida e diversas ferramentas surgiram nas últimas décadas.

Para citar algumas: filtros digitais, Transformada Discreta Fourier (DFT), Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a mais recente Transformada *Wavelet* Discreta (DWT) (WEEKS, 2012).

Diversas publicações tem mostrado a aplicação das técnicas de PDS nas análises de oscilografias. O Quadro 1 relaciona algumas publicações de acordo com a ferramenta utilizada e o objetivo da aplicação. Em várias delas a transformada *wavelet* é utilizada como ferramenta. Percebe-se que nenhum dos estudos enumerados abordou a análise de ocorrências de desligamentos forçados em oscilografias de curta duração de unidades geradoras. Assim esse estudo se propõe a estudar a aplicação da transformada *wavelet* nesta análise e preencher a lacuna de pesquisas.

Aplicação	Ferramenta utilizada	Referência
Identificação e classificação de faltas no sistema de transmissão da Chesf.	Transformada <i>wavelet</i> .	(BRITO, SOUZA e COSTA, 2010)
Detecção de distúrbios de qualidade de energia.	Energia dos coeficientes <i>wavelets</i> .	(COSTA et al., 2011)
Diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios no sistema de transmissão.	Transformada <i>wavelet</i> .	(COSTA, 2010)
Classificação de distúrbios na rede elétrica de transmissão de energia.	Transformada <i>wavelet</i> e redes neurais.	(CÂNDIDO, MEDEIROS JR. e OLIVEIRA, 2009)
Pré-análise e triagem dos registros de oscilografias repassados ao ONS pelos agentes do sistema de transmissão de energia elétrica.	Não informada.	(GIOVANINI et al., 2008)
Análise automática de distúrbios de qualidade de energia elétrica.	Transformada de Fourier.	(KEZUNOVIC e LIAO, 2001)
Monitoração e avaliação do estado de transformadores de potencial capacitivo.	Transformada rápida de Fourier.	(LACHMAN, 2007)
Avaliação do desempenho de relés digitais de proteção de unidades geradoras.	Não informada.	(LENZ e ROLIM, 2009)
Identificação e classificação de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica.	Transformada <i>wavelet</i> e rede neural probabilística.	(MENESES e ROCHA, 2009)
Análise automática de perturbações em unidades geradoras para arquivar automaticamente registros que não necessitem de análise detalhada.	Sistemas especialistas e filtro de Kalman.	(MORETO, 2011)
Monitoramento e estimativa dos tempos de operação de disjuntores em subestações de transmissão de energia elétrica.	Transformada de Fourier e transformada <i>wavelet</i> .	(SILVA, 2005)
Localização de faltas em linhas de transmissão.	Transformada <i>wavelet</i> .	(SILVA, OLESKOVICZ e COURY, 2005)
Detecção de mudanças abruptas nos registros de oscilografias da rede de transmissão.	Transformada <i>wavelet</i> , filtros adaptativos e estatística.	(UKIL e ZIVANOVIC, 2006)
Detecção dos instantes de mudanças abruptas nos registros de oscilografias da rede de energia da África do Sul.	Filtros de Kalman e estatística.	(UKIL e ZIVANOVIC, 2007)

Quadro 1: Publicações: objetivo da aplicação versus ferramenta utilizada.

3. ASPECTOS GERAIS DE OSCILOGRAFIAS E TRANSFORMADA WAVELET

Neste capítulo é feita uma revisão dos conceitos fundamentais necessários para compreensão e implementação da metodologia proposta para a realização da análise automática de oscilografias de curta duração de unidades geradoras, foco desta pesquisa.

3.1 OSCILOGRAFIAS

O termo “oscilografia” refere-se aos registros produzidos pelos oscilógrafos. Estes são equipamentos desenvolvidos para registrar oscilações elétricas e o nome vem de “oscilar” + “grafo”, ou seja, escrita de oscilações. Originalmente esses equipamentos eram dotados de agulhas registradoras conectadas a bobinas eletromagnéticas que transformavam oscilações de corrente elétrica em oscilações mecânicas na ponta de uma agulha, que por sua vez, literalmente, escreviam o registro da oscilação.

Com a evolução tecnológica os antigos oscilógrafos se modernizaram e passaram a ser chamados de Registradores Digitais de Perturbações, ou pela sigla RDPs, que atualmente se baseiam em tecnologia digital e mantem os registros em memória. Porém, os profissionais do meio técnico e acadêmico se mantêm fiéis ao uso do termo oscilografia para se referir aos arquivos digitais produzidos pelos RDPs. A Figura 3 mostra um RDP moderno da Reason Tecnologia S.A.



Figura 3: Registrador Digital de Perturbações Multifunções RPV-310.
Fonte: (REASON, 2010).

Este modelo tem sido largamente empregado pelas concessionárias de energia e possui as seguintes especificações técnicas (REASON, 2010):

- Até 64 entradas analógicas (tensão, corrente e transdutores DC);
- Até 384 entradas digitais;
- Até 256 grandezas binárias obtidas de mensagens GOOSE segundo IEC 61850;
- Conversores analógico-digitais de 16 bits;
- Taxa de amostragem de 256 pontos-por-ciclo;
- Gravação de registros de forma de onda com 256, 128 ou 64 pontos-por-ciclo;
- Registros de longa duração contínua e por *trigger*;
- Aquisição sincronizada à referência externa de tempo padrão IRIG-B;
- Medição e registro de harmônicas até 50^a ordem;
- Sinalização de falha do equipamento.

No formato digital existem diversas maneiras de gravar informações e diferentes fabricantes de equipamentos tendem a utilizar diferentes técnicas. Porém isto dificulta o acesso e manipulação dessas informações pelos usuários. Para facilitar a troca de informações dos registros e compatibilidade entre fabricantes o

ONS adota o padrão IEEE COMTRADE para padronizar os registros dos RDPs instalados no sistema elétrico brasileiro (ONS, 2009).

O padrão COMTRADE, determina que as informações dos RDPs sejam divididas e gravadas em quatro arquivos de dados. Os quatro arquivos devem possuir o mesmo nome apenas diferindo na extensão, a qual indica o tipo de conteúdo do arquivo. Os arquivos com suas extensões são os seguintes (IEEE STD., 1999):

- Arquivo de cabeçalho (xxxxxxx.HDR) – é um arquivo de texto no formato ASCII. As informações contidas neste arquivo podem ser impressas e manipuladas diretamente pelo usuário que pode entender melhor as condições apresentadas. Não há um padrão a ser seguido, o IEEE apenas sugere alguns tipos de informações possíveis para serem descritas em um arquivo de cabeçalho, as quais irão auxiliar na interpretação dos dados: descrição do sistema de energia, nome da estação, identificação da linha, transformador, reator, capacitor, ou disjuntor que é monitorado por cada canal, tensão nominal de enrolamento de transformadores, especialmente a potência e a corrente, a sequência de fase de entrada dentre outras informações (SANTOS et al., 2012);
- Arquivo de configuração (xxxxxxx.CFG) – é um arquivo de texto no formato ASCII que é lido por softwares especializados, por isso, é escrito em formato específico. O arquivo é dividido em linhas e as linhas em campos. Vírgulas são utilizadas como delimitador de campo, mesmo que o respectivo dado não seja especificado permitindo que o comprimento de cada campo seja variável. A informação em cada linha do arquivo deve ser listada na ordem exata requerida. Qualquer desvio do padrão estipulado anula todo o conjunto de arquivos. Contém as informações necessárias para interpretação do arquivo de dados (.DAT) e por isso não é opcional. As seguintes informações devem estar contidas no arquivo de configuração (IEEE STD., 1999):
 - Nome da estação, identificação do dispositivo de monitoração, ano de revisão do padrão COMTRADE;
 - Número e tipos dos canais;
 - Nome dos canais, unidades, a fatores de conversão;
 - Frequência da linha;

- Taxa de amostragem;
- Data e tempo do primeiro dado;
- Data e tempo do ponto de acionamento da falta (*trigger*);
- Tipo do arquivo de dados; e
- Fator de multiplicação da estampa de tempo.

A Figura 4 mostra um exemplo de arquivo de configuração, onde pode ser visto na primeira linha a identificação da subestação, do dispositivo de monitoração e o ano do padrão COMTRADE. A segunda linha especifica nove canais de entrada sendo todos analógicos, e nas linhas seguintes estão os nomes dos canais com suas unidades e fatores de conversão. Na sequência é especificada a frequência, a taxa de amostragem, data do primeiro dado e do ponto de *trigger*, tipo do arquivo e fator de multiplicação da estampa de tempo.

```
SE,RDP,1999
9,9A,0D
1,VA,,V,17.44,0,0,-32768,32767,1,1,S
2,VB,,V,17.44,0,0,-32768,32767,1,1,S
3,VC,,V,17.44,0,0,-32768,32767,1,1,S
4,Reator_IA,,A,0.221,0,0,-32768,32767,1,1,S
5,Reator_IB,,A,0.221,0,0,-32768,32767,1,1,S
6,Reator_IN,,A,0.05524,0,0,-32768,32767,1,1,S
7,LT Ia,A,A,0.023187,-1.28851,0,-32767,32767,1200,5,S
8,LT Ib,B,A,0.0637747,-145.13,0,-32767,32767,1200,5,S
9,LT In,N,A,0.0864938,227.923,0,-32767,32767,1200,5,S
60
1
1440,1968
21/02/2007,22:35:56.895000
21/02/2007,22:35:57.146674
ASCII
1
```

Figura 4: Exemplos de registro de oscilografia: arquivo de configuração (.cfg)
Fonte: Autoria própria.

- Arquivo de dados (xxxxxxx.DAT) – contém o número da amostra, a estampa de tempo e o valor de cada amostra dos canais de entrada do registro gravado. Os dados são dispostos conforme descreve o arquivo de configuração que também especifica os fatores de conversão para converter os valores apresentados em dados concretos, pois os números armazenados representam apenas uma escala dos valores reais. Além dos dados das entradas analógicas, pode-se registrar entradas digitais. Nesse caso, o estado da entrada é associado a níveis lógicos (SANTOS et al., 2012).

O arquivo de dados pode ser escrito em formato ASCII ou em formato binário e isto é especificado em um dos campos do arquivo de configuração.

Para o formato ASCII o delimitador de campos é a vírgula enquanto em arquivos binários usa-se o tamanho de cada informação como delimitador.

No formato ASCII, o arquivo é dividido em linhas e colunas. O número de linhas varia de acordo com o tamanho da amostra e afeta diretamente o tamanho total do arquivo. O número de colunas depende da quantidade de canais analisados e também afeta o tamanho total do arquivo. A seguir é mostrada a sequência de informações necessárias (IEEE STD., 1999):

- A primeira coluna contém o número da amostra;
- A segunda coluna é a estampa de tempo;
- A terceira coluna representa o conjunto de dados dos canais analógicos;
- As próximas colunas representam o conjunto de dados dos canais digitais.

Não pode haver quebra de linha entre os dados referentes ao mesmo tempo de amostragem. O arquivo deve terminar com um caractere ASCII de EOF, *End Of File*, referente ao término de arquivo.

A Figura 5 mostra o conteúdo do arquivo .DAT para o mesmo registro da Figura 4. Verifica-se que o arquivo é composto por onze colunas, separadas por vírgulas, conforme o formato ASCII especificado no arquivo de configuração. A primeira coluna especifica o número da amostra, a segunda a estampa de tempo e as nove seguintes o valor da amostra para o canal correspondente. Cada linha corresponde a uma nova amostra para os mesmos canais.

```
0000000001,0000000000,006343,004197,-11227,000216,-00234,000026,000055,002275,-02635
0000000002,000000694,004218,006300,-11082,000259,-00191,000025,000055,002275,-02635
0000000003,0000001388,001707,008611,-10502,000252,-00155,000016,000055,002275,-02635
0000000004,0000002083,-01557,010612,-08871,000264,-00084,000024,000055,002275,-02635
0000000005,0000002777,-04251,011157,-06455,000247,-00027,000019,000055,002275,-02635
0000000006,0000003472,-06356,011005,-03978,000206,000051,000023,000055,002275,-02635
0000000007,0000004166,-08615,010421,-01432,000151,000110,000019,000055,002275,-02635
0000000008,0000004861,-10590,008652,001612,000092,000167,000024,000055,002275,-02635
0000000009,0000005555,-11324,006349,004403,000035,000222,000024,000055,002275,-02635
0000000010,0000006250,-11339,004231,006469,-00039,000255,000027,000055,002275,-02635
0000000011,0000006944,-10675,001713,008579,-00098,000268,000019,000055,002275,-02635
0000000012,0000007638,-08772,-01462,010547,-00166,000257,000029,000055,002275,-02635
0000000013,0000008333,-06353,-04197,011230,-00210,000239,000022,000055,002275,-02635
0000000014,0000009027,-04229,-06294,011084,-00242,000201,000019,000055,002275,-02635
0000000015,0000009722,-01707,-08608,010487,-00260,000152,000027,000055,002275,-02635
0000000016,0000010416,001551,-10610,008867,-00253,000101,000029,000055,002275,-02635
0000000017,0000011111,004244,-11159,006467,-00230,000025,000025,000055,002275,-02635
0000000018,0000011805,006348,-11007,003985,-00174,-00030,000024,000055,002275,-02635
```

Figura 5: Exemplos de registro de oscilografia: arquivo de dados (.dat)

Fonte: Autoria própria.

- Arquivo de informações (xxxxxxx.INF) - é um arquivo opcional em formato ASCII que contém informações extras que a fonte de dados deseja tornar disponível para os usuários. Este arquivo também pode conter informações privadas, só interpretáveis pelo fabricante (IEEE STD., 1999).

Além das informações contidas nos arquivos COMTRADE, muitos fabricantes de equipamentos implementaram uma funcionalidade a mais, o registro de longa duração ou simplesmente registro fasorial. Esse registro apresenta uma duração da ordem de minutos e registra apenas informações de módulo e ângulo das tensões e correntes amostradas em uma taxa menor. Essas informações são úteis para análises de fluxo de potência e oscilações de baixa frequência, como as de origem mecânica (MORETO, 2011).

Como esse tipo de registro não estava definido no padrão COMTRADE definido na norma IEEE C37.111-1999, cada fabricante de RDP criou seu próprio padrão, acrescentando arquivos ao registro. A nova revisão do padrão IEEE C37.111-2013 define um esquema para acrescentar as informações desse registro no arquivo de dados (.DAT) adicionando dois canais analógicos, um para o módulo e outro para a fase, de cada sinal que se deseja criar um registro fasorial (IEEE STD, 2013).

O conteúdo dos registros no padrão COMTRADE pode assim ser lido por softwares especializados, que utilizam as informações do arquivo de configuração, para interpretar os arquivos de dados e construir gráficos. Assim a informação torna-se amigável aos olhos de um analista, que consegue interpretar as oscilações registradas e determinar uma causa para a mesma.

Ao transformar os dados dos registros de oscilografia para informações, podemos classifica-las em três tipos principais (MORETO e ROLIM, 2010).

3.1.1 Registro de curta duração

Consiste no gráfico produzido através dos dados dos canais analógicos de tensão e corrente monitorados, com uma taxa de aquisição alta, da ordem de 256 pontos-por-ciclo (REASON, 2010). Em função da alta taxa de aquisição são armazenados apenas alguns segundos. Este registro também é chamado de registro

de forma de onda, pois permite visualizar a forma de onda do canal monitorado. A Figura 6 mostra um exemplo deste tipo de informação para três canais de tensão monitorados, sendo um canal para cada fase.

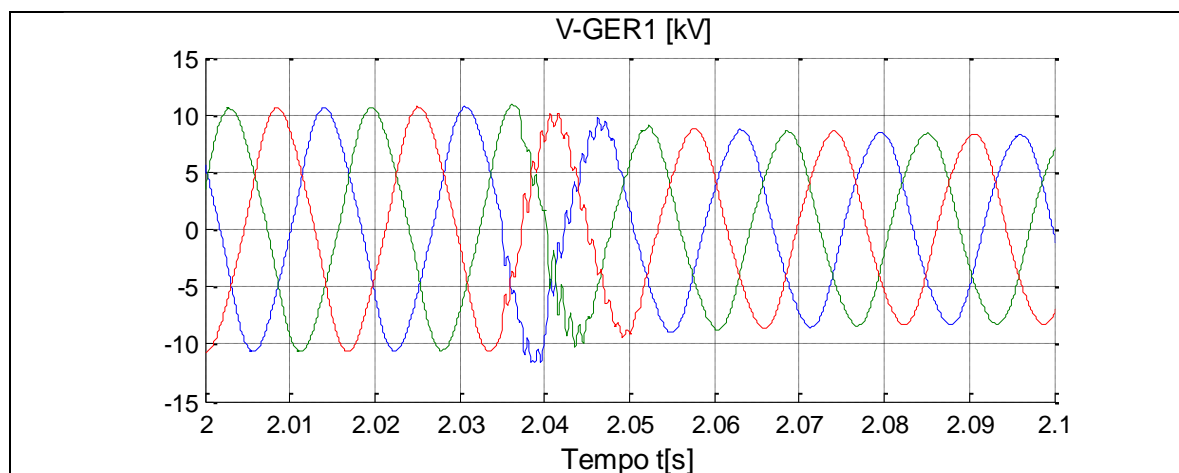


Figura 6: Exemplos de registro de curta duração.
Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Registro de longa duração

Consiste no registro dos fasores de um canal, ou seja, apenas o módulo e o ângulo do sinal monitorado são registrados, com uma taxa de aquisição bem menor que o registro de forma de onda, permitindo-se assim registrar até alguns minutos de informações. A Figura 7 mostra um exemplo de registro fasorial, como também é conhecido.

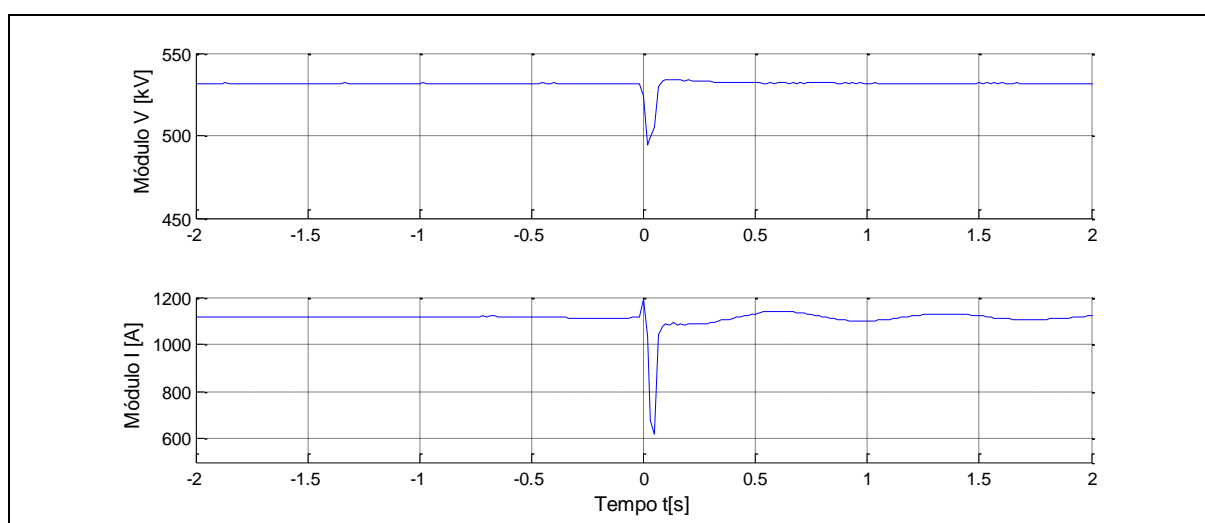


Figura 7: Exemplos de registro de longa duração.
Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Sequência de eventos

O monitoramento dos canais digitais permite criar uma sequência cronológica dos eventos ocorridos, como atuação de proteção, abertura de disjuntor, atuação de proteções secundárias ou de retaguarda entre outros. A Figura 8 mostra um exemplo de sequência de eventos em um registro de oscilografia.

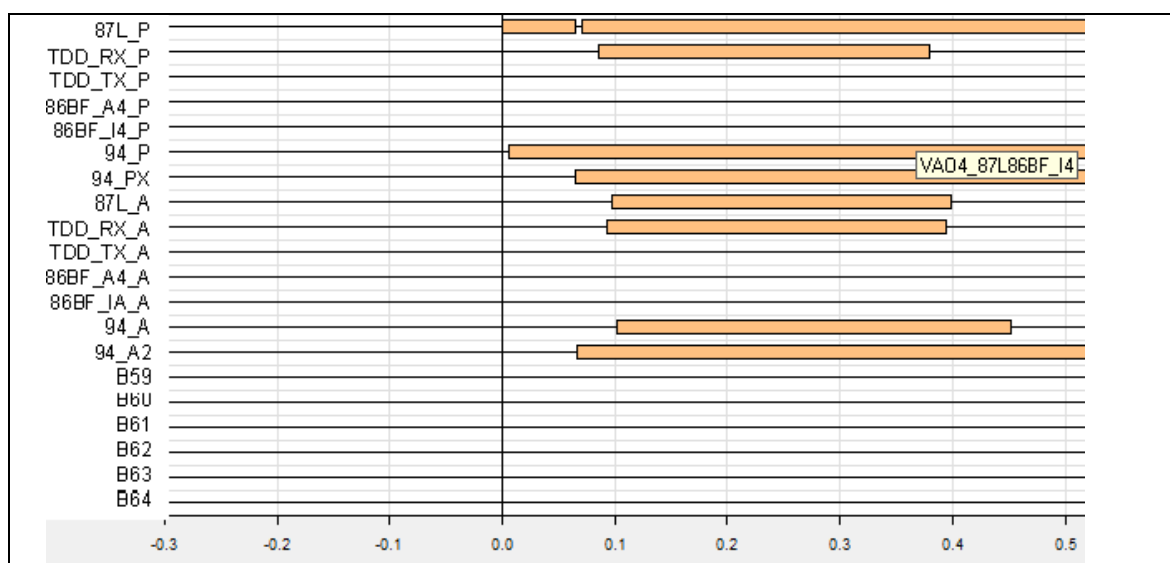


Figura 8: Exemplos de registro de sequência de eventos.

Fonte: Autoria própria.

As leituras dos registros a que se referem as Figura 6 e Figura 7 foram realizadas em rotina desenvolvida no MATLAB^{®1} e para a Figura 8 foi realizada no software SIGRA 4 – *Fault Record Evaluation*^{®2}.

¹ MATLAB[®]: ambiente de desenvolvimento de algoritmos e análise de dados da MathWorks Inc.

² SIGRA 4 – *Fault Record Evaluation*[®]: software de visualização de oscilografias da Siemens AG.

3.2 FUNDAMENTOS DA TRANSFORMADA WAVELET

3.2.1 Por que *wavelets*

O emprego da matemática para descrever e explicar fenômenos físicos não é nenhuma novidade. No passado diversos físicos tiveram que desenvolver teorias matemáticas para representar fenômenos por eles estudados. No século XVII o físico inglês Isaac Newton, sentiu necessidade de ferramentas matemáticas específicas para exprimir relações entre grandezas mecânicas. Ao estudar o que chamava de “fluxões das variáveis” Newton definiu o conceito de derivadas e integrais, a base do cálculo infinitesimal amplamente utilizado atualmente. (CARVALHO e D'OTAVIANO, 2006).

Nos dias atuais a matemática não só descreve os fenômenos físicos, mas possibilita a solução de problemas do mundo real. Através do processamento computacional solucionam-se problemas que, em alguns casos, necessitariam anos para ser solucionados de maneira analítica, além disso, é possível obter soluções para problemas que sequer possuem solução analítica. E quando se trata de problemas do mundo real recai-se diretamente sobre o Processamento Digital de Sinais (PDS), área da engenharia que têm evoluído com métodos cada vez mais complexos e sempre embasados em teorias oriundas da matemática (WEEKS, 2012).

No século XIX o matemático e físico francês Jean Baptiste Joseph Fourier publicou seu estudo sobre ondas e calor no qual propõem que um sinal periódico qualquer pode ser representado por uma única expressão analítica. Ele acabava de criar uma das ferramentas mais utilizadas na análise de sinais e que leva seu nome, a “Análise de Fourier” ou no método matemático Transformada de Fourier (FT – *Fourier Transform*) (OLIVEIRA, 2007). Aplicando-se a FT a um sinal óptico, por exemplo, obtêm-se a sua decomposição nas cores fundamentais do arco íris, onde cada cor corresponde a uma frequência. Se uma das frequências possuir maior amplitude que as demais o feixe de luz terá a cor correspondente a esta frequência predominante. Este é um exemplo básico da análise de sinais que pôde ser

desenvolvida a partir do método matemático proposto por Fourier e que na matemática é representado pela integral da equação (1).

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

Onde:

$f(t)$: sinal de tempo contínuo t ;

w : frequência angular em rad/s;

$F(w)$: sinal contínuo na frequência w .

(1)

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

A FT tornou-se uma ferramenta amplamente utilizada em diferentes campos como óptica, física, telecomunicações, computação, eletrônica e elétrica. Essencialmente ela consiste em uma transformação linear que troca a base do tempo para a base da frequência de um sinal. Isso permite olhar, analisar e manipular informações na base da frequência, o que em determinadas aplicações é mais adequado do que na base do tempo (MIX e OLEJNICZAK, 2003).

Ao aplicar a FT em um sinal analógico ou de tempo contínuo, é possível visualizar as senoides fundamentais que formam este sinal. A Figura 9 mostra um exemplo de sinal que é composto por várias senoides de diferentes frequências e amplitudes.

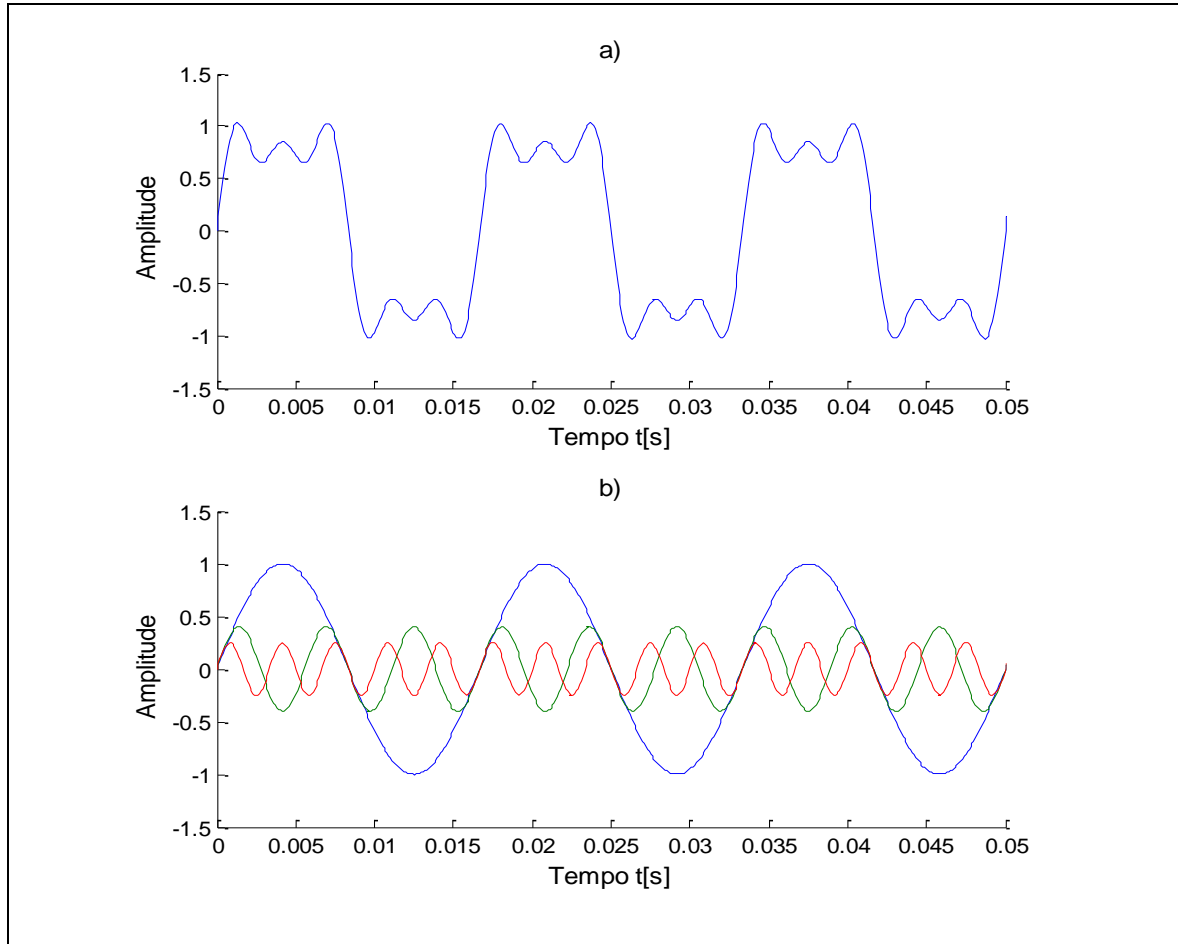


Figura 9: a) Sinal de tempo contínuo periódico. b) Decomposição feita pela FT em sinais de frequências fundamentais.

Fonte: Autoria própria.

Um sistema de som permite alterar amplitudes de bandas de frequências específicas em uma música, realizando sua mixagem, eliminando ruídos indesejados ou criando uma nova versão da música original. Esse tipo de aplicação pode ser feito em um arquivo de áudio digital com dados discretos, por exemplo, no formato mp3, utilizando a Transformada Discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) que pode ser expressa na forma da equação (2) (WEEKS, 2012).

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi nm/N}$$

(2)

Onde:

$x[n]$: sinal discreto com $(N - 1)$ amostras;

$X[m]$: sinal discreto transformado onde $m = 0, \dots, N - 1$;

Fonte: (WEEKS, 2012)

Este tipo de análise em sinais discretos é exemplificado na Figura 10 que, através da aplicação da DFT, mostra as frequências que compõem um sinal discreto no tempo.

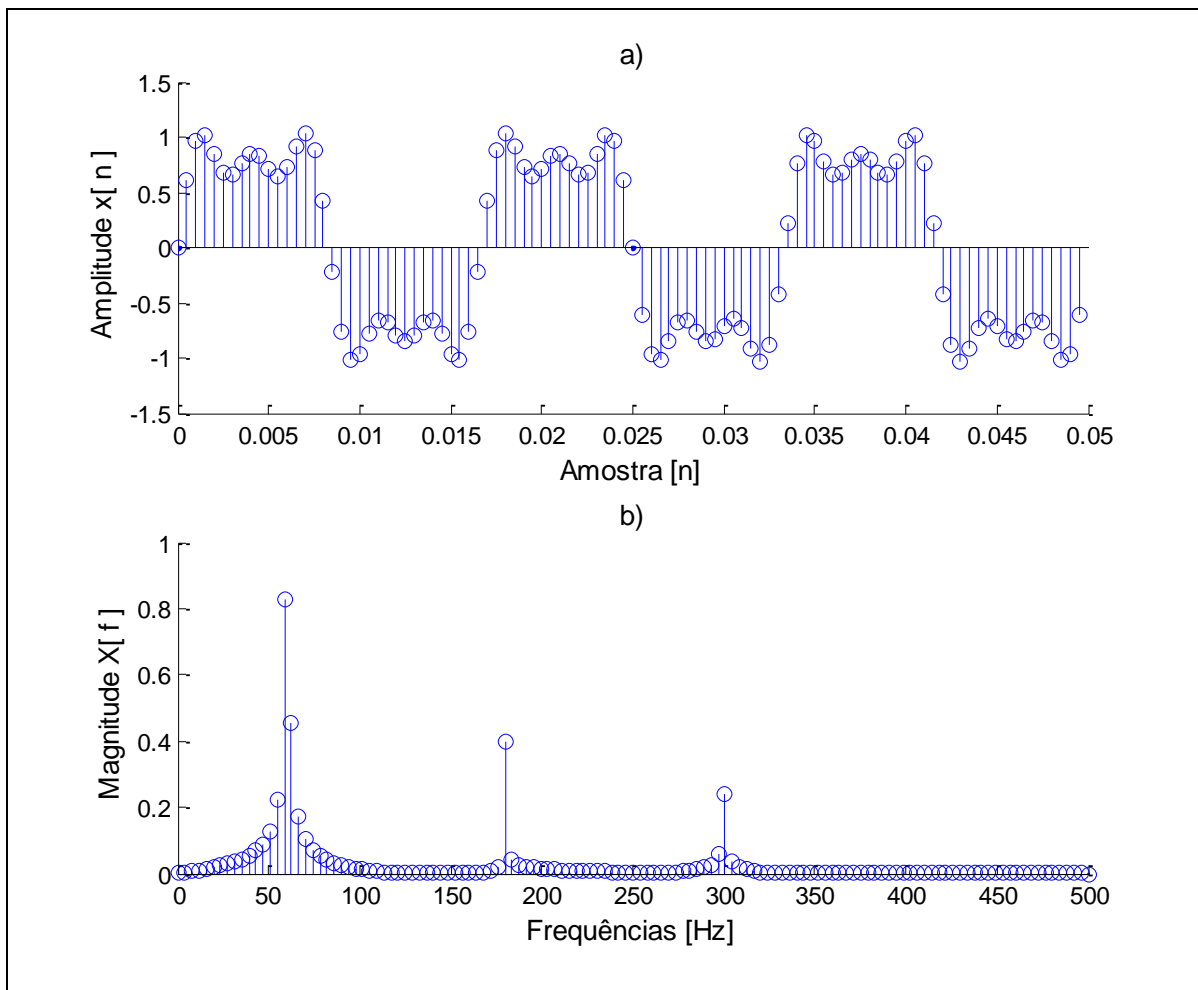


Figura 10: a) Sinal discreto no tempo. b) Magnitude dos fasores de frequências distintas que compõem o sinal discreto, obtidas a partir da DFT.
Fonte: Autoria própria.

A FT mostra informações sobre quais frequências formam um sinal, representando uma média de todo o sinal desde seu início até seu final, ou seja, do tempo $-\infty$ ao $+\infty$ como pode ser visto na integral da equação (1). A contribuição de cada harmônica do sinal completo fica explícita. Porém a informação correspondente ao instante de tempo em que as frequências ocorrem é perdida. Isto fica mais evidente quando aplicamos a FT em um sinal não estacionário como o da Figura 11. Na Figura 11 b) vê-se apenas a informação das frequências que compõem o sinal da Figura 11 a) mas não o instante de tempo em que elas ocorrem.

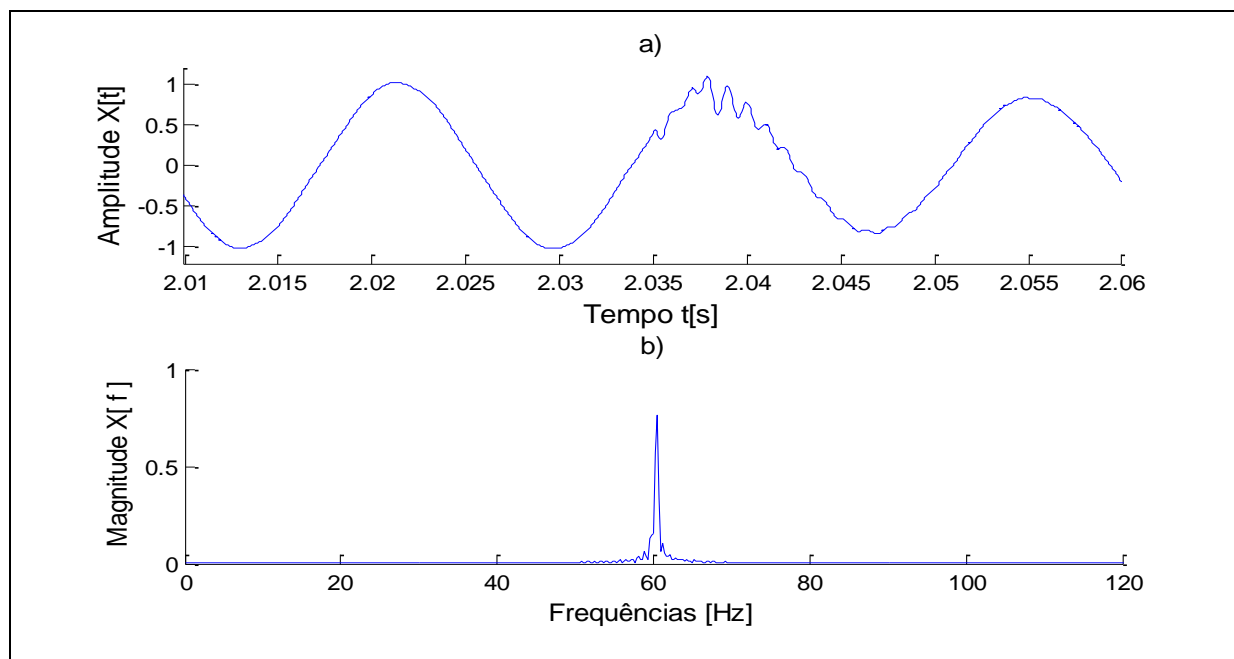


Figura 11: a) Sinal de registro de oscilografia. b) Frequências que compõem o sinal, obtidas a partir da FT.

Fonte: Autoria própria.

A grande desvantagem da FT para aplicação em análise de sinais é o fato de ela não ser capaz de fornecer informações sobre o tempo, apenas frequências. Sendo assim ela é útil para análise de sinais periódicos ou estacionários, ou seja, que apresentem um comportamento repetitivo ao longo tempo, como os sinais da Figura 9 e da Figura 10 (OLIVEIRA, 2007).

Para analisar sinais não estacionários Denis Gabor, em 1946, propôs uma adaptação da FT. Esta adaptação consiste em dividir, o sinal sob análise, em intervalos menores e aplicar a FT a cada intervalo ou “janela” de tempo do sinal original, definindo assim a Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT – *Short Time Fourier Transform*) como mostra a Figura 12.

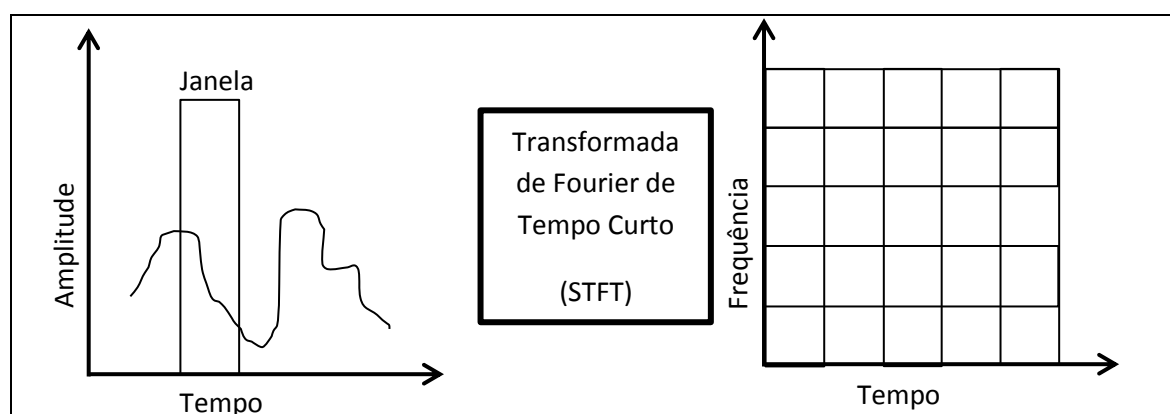


Figura 12: Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT).

Fonte: Adaptado de (DELMONT et al., 2003).

Para cada janela da Figura 12 é aplicada a FT ao sinal e obtêm-se como resultado a informação das frequências que o compõem gerando um gráfico bidimensional tempo x frequência. A STFT consiste em uma transformada local, que analisa o sinal no tempo $f(t)$ através de uma “janela” $W(t)$, centrada em um instante de tempo t e limitada há um tempo inicial e final. A representação matemática da STFT é dada pela equação (3) (OLIVEIRA, 2007).

$$STFT(w, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)W(t - \tau)e^{-j\omega t} dt$$

Onde:

$W(t - \tau)$: função janela centrada em t e de largura τ ;

$STFT(w, \tau)$: sinal contínuo na frequência w para cada janela.

(3)

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

A Figura 13 c) mostra o plano tempo versus frequência, de um registro de oscilografia com perturbação, obtido pela STFT com uma largura de 0,1333 s para a janela de tempo. A Figura 13 a) mostra em detalhe a perturbação no sinal registrado que é mostrado na Figura 13 b). Analisando a Figura 13 c) é possível identificar que entre os instantes 2,1 s e 2,2 s surgem componentes de frequências maiores que não ocorrem no restante do sinal. Isso pode ser visto na Figura 13 c) através da cor, cores mais “quentes” representam maior amplitude das componentes de frequência. Através do detalhe da Figura 13 a) percebe-se que o intervalo mais exato da perturbação está entre 2,025 s e 2,045 s. Se a largura τ da janela de tempo for reduzida poderá informar com mais precisão o instante da perturbação. A escolha da largura τ da janela para a Figura 13 foi baseada em testes sobre o sinal original. Porém, em aplicações reais há dificuldade na escolha da largura da janela, uma vez que, normalmente, não se conhece *a-priori* o tipo de perturbação que poderá incidir no sinal.

A STFT relaciona informações de frequências com o tempo, minimizando a deficiência da FT. Verifica-se que a STFT fornece mais informações, porém a resolução das informações sobre as frequências é a mesma em todo o intervalo de

tempo analisado e determinada pela largura da janela escolhida para a STFT, tornando-a ineficiente na identificação do instante de ocorrência de transitórios em sinais. (COSTA, 2010).

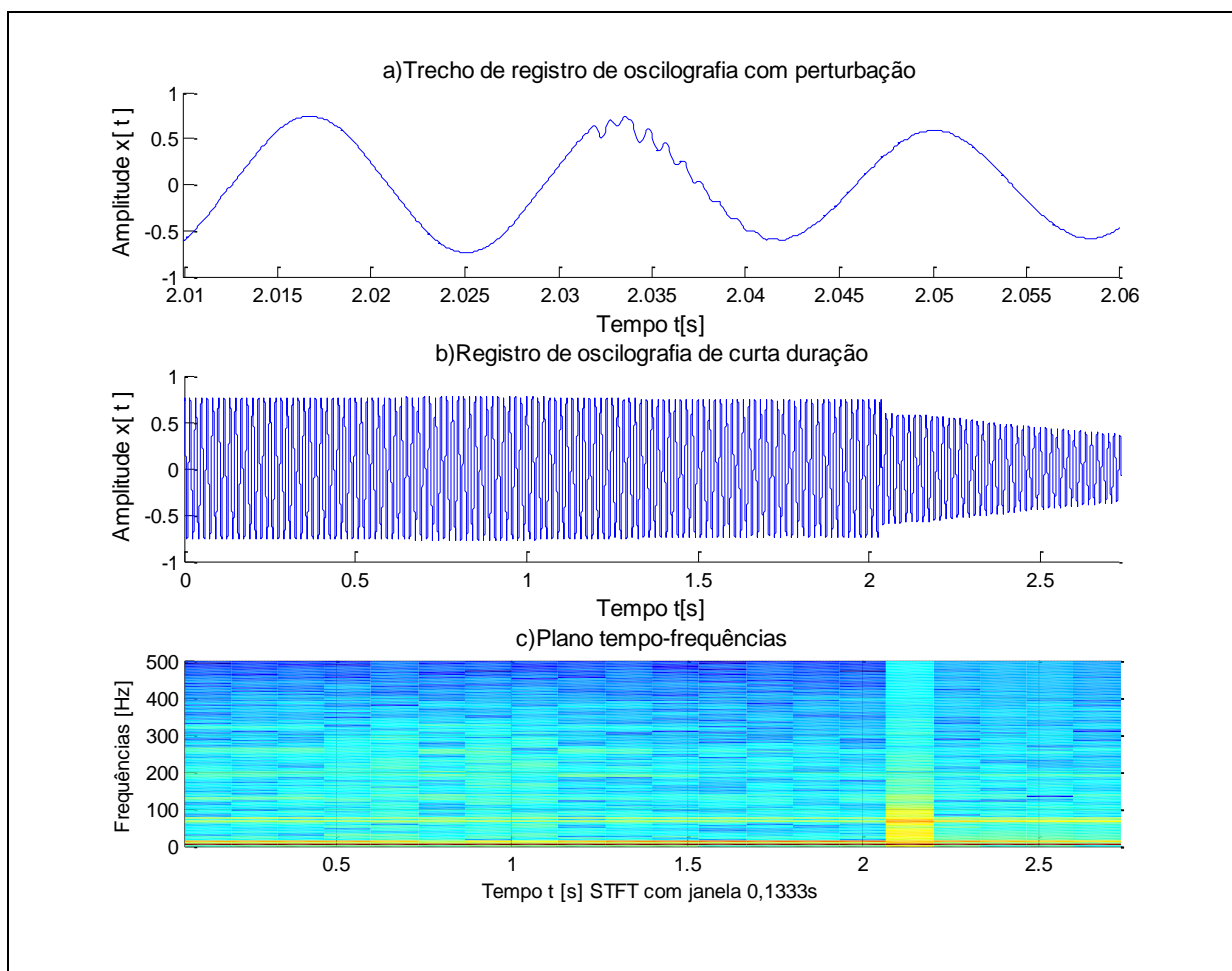


Figura 13: a) Trecho de registro de oscilografia com perturbação. b) registro de oscilografia de curta duração. c) Plano tempo versus frequência, obtido pela STFT. Fonte: Autoria própria.

O sinal não estacionário analisado na Figura 13 é um sinal típico dos registros de oscilografia de sistemas elétricos. Sinais com características semelhantes também ocorrem em registros de sismógrafos, os quais foram estudados pelo geofísico Jean Morlet na década de oitenta, orientado por Alex Grossman (físico teórico) na França. Nestes sinais as componentes de frequências mudam rapidamente ao longo do tempo podendo surgir a qualquer momento (aperiódicos). Nestes casos a STFT não é suficiente para extrair informações precisas dos sinais. Nos intervalos que contém frequências mais altas uma maior aproximação é conveniente, necessitando-se variar o tamanho da janela para determinar com exatidão o tempo ou a frequência. Assim Morlet propôs uma nova

transformada, denominada Transformada *Wavelet* (WT – *Wavelet Transform*), na qual a largura da janela é variável, permitindo que altas frequências possam ser localizadas com uma maior precisão (DAUBECHIES, 1990).

Oliveira (2007) exemplifica com a comparação: “a análise através da WT permite visualizar tanto a floresta como as árvores”, o que pode ser percebido na Figura 14. Na Figura 14 b) vê-se que a janela de tempo que localiza as frequências mais altas é menor do que na Figura 14 a), ou seja, a resolução para as frequências mais altas é melhor na WT do que na STFT.

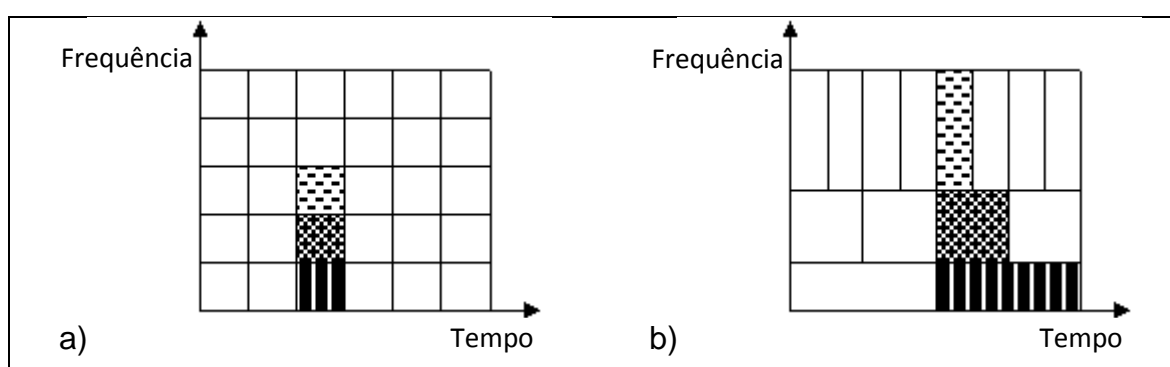


Figura 14: Resolução no plano tempo-frequência a) Obtido pela STFT b) Obtido pela WT.
Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2007).

3.2.2 A transformada *wavelet* contínua - CWT

Matematicamente a Transformada *Wavelet* Contínua (CWT – *Continuous Wavelet Transform*) pode ser expressa pela equação (4).

$$F(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\Psi_{a,b}(t)dt$$

Onde:

$f(t)$: sinal contínuo no tempo t ;

$\Psi_{a,b}(t)$: *wavelet* mãe, base da transformada.

Fonte: (DELMONT et al., 2003)

Em (4) os parâmetros a e b variam continuamente no conjunto dos reais \mathbb{R} , sendo a função $\Psi_{a,b}$ chamada de *wavelet* mãe e definida conforme a equação (5)

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

Onde:

a : parâmetro de escala ou dilatação;

b : parâmetro de tempo ou translação.

(5)

Fonte: (DELMONT et al., 2003)

Através das equações (4) e (5) verifica-se que a CWT depende de dois parâmetros, a e b , que correspondem, respectivamente, às informações de escala e de tempo, ou dilatação e translação. Quando $a > 1$ tem o efeito de dilatação da função *wavelet* mãe. Quando $a < 1$ tem o efeito de contração da função *wavelet* mãe. Na medida em que b varia o sinal é analisado em torno de b . Desta forma um sinal unidimensional $f(t)$ é transformado em um sinal bidimensional $F(a,b)$ permitindo uma análise tempo versus frequência assim como na STFT, porém com a resolução aumentada quanto maior forem as frequências, fornecendo uma espécie de *zoom* na escala de tempo das mais altas frequências. (DELMONT et al., 2003).

Comparando as equações (1) e (4) percebe-se que a CWT representa uma generalização da FT. Tomando a equação (4) e utilizando como *wavelet* mãe a função exponencial complexa obtém-se a equação (1), da FT, como um caso particular da CWT. A CWT é uma transformada linear e sua base é a *wavelet* mãe (OLIVEIRA, 2007).

3.2.2.1 Famílias de *wavelets*

Diversas funções podem ser escolhidas como base ou *wavelet* mãe para a CWT, porém devem ter comportamento oscilatório e de curta duração. A origem do termo *wavelet* se deu pela união dos termos: “oscilatório” (onda) e “curta duração” (ondinha). Daí um dos critérios para verificar se uma função pode ser utilizada como *wavelet* é provar que ela é oscilatória, ou seja, que seu valor médio é nulo. Isto pode ser feito através da integral da equação (6).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0$$

(6)

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

A *wavelet* mãe também deve possuir energia limitada, ou seja, deve ser verificada a condição da equação (7).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (7)$$

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

Diversas funções têm sido estudadas e propostas como *wavelets*. A *wavelet* mais simples é a *Wavelet* de Haar, que consiste em uma função contínua por partes e pode ser empregada na análise de sinais com mudanças abruptas. A equação (8) define a *Wavelet* de Haar e a Figura 15 a ilustra.

$$\psi^{(haar)}(t) = \begin{cases} +1 & \text{para } (0 \leq t < 1,5) \\ -1 & \text{para } (1,5 \leq t < 3) \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (8)$$

Fonte: (DELMONT et al., 2003)

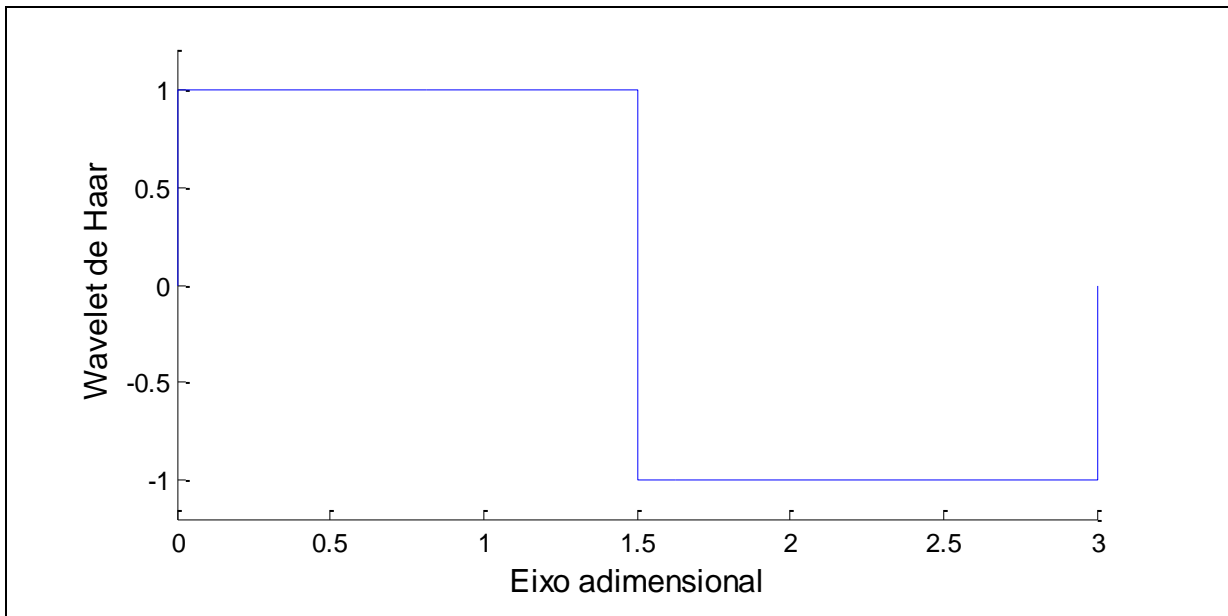


Figura 15: *Wavelet* de Haar.
Fonte: Gerada com MATLAB®.

A *Wavelet* Chapéu Mexicano é definida pela equação (9) e sua forma, já anunciada pelo nome, pode ser vista na Figura 16.

$$\psi^{(mexh)}(t) = \frac{2(t^2 - 1)e^{-t^2/2}}{\pi^{1/4}\sqrt{3}} \quad (9)$$

Onde:

t : tempo ou variável independente;

e : exponencial;

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

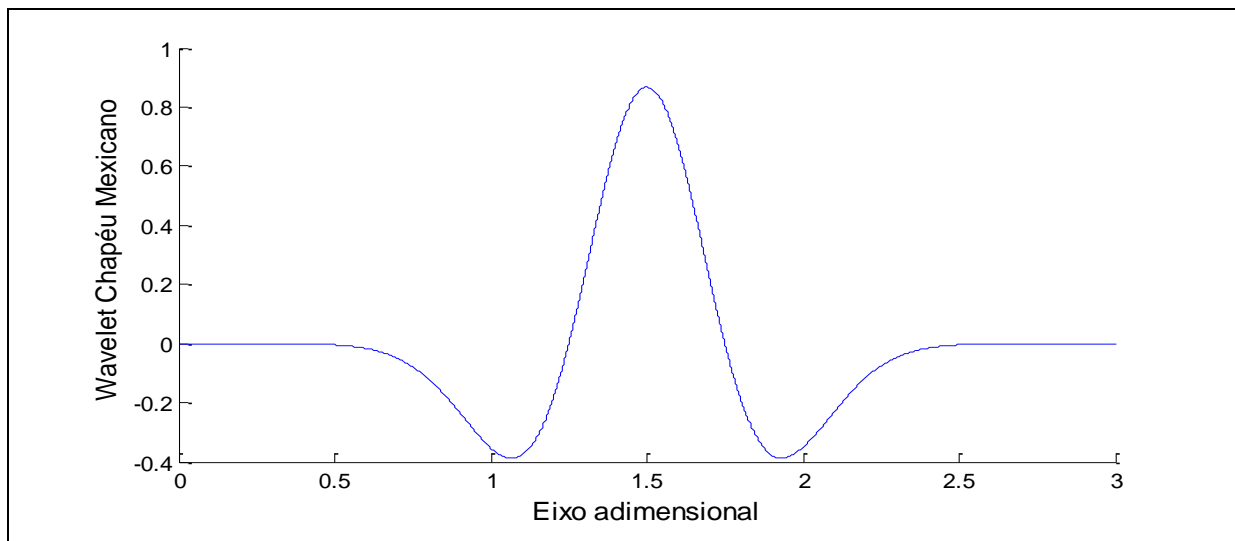


Figura 16: *Wavelet* Chapéu Mexicano.
Fonte: Gerada com MATLAB®.

A *Wavelet* de Morlet foi uma das primeiras propostas com a finalidade de análise de sinais e se originou dos estudos de Morlet sobre geofísica e análise de sinais sísmicos. A *Wavelet* de Morlet está definida na equação (10) e sua forma exemplificada pela Figura 17.

$$\psi^{(morl)}(t) = \frac{1}{\pi^{1/4}} e^{-t^2/2} e^{-jw_0 t}$$

Onde:

t : tempo ou variável independente;

w : frequência angular;

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

(10)

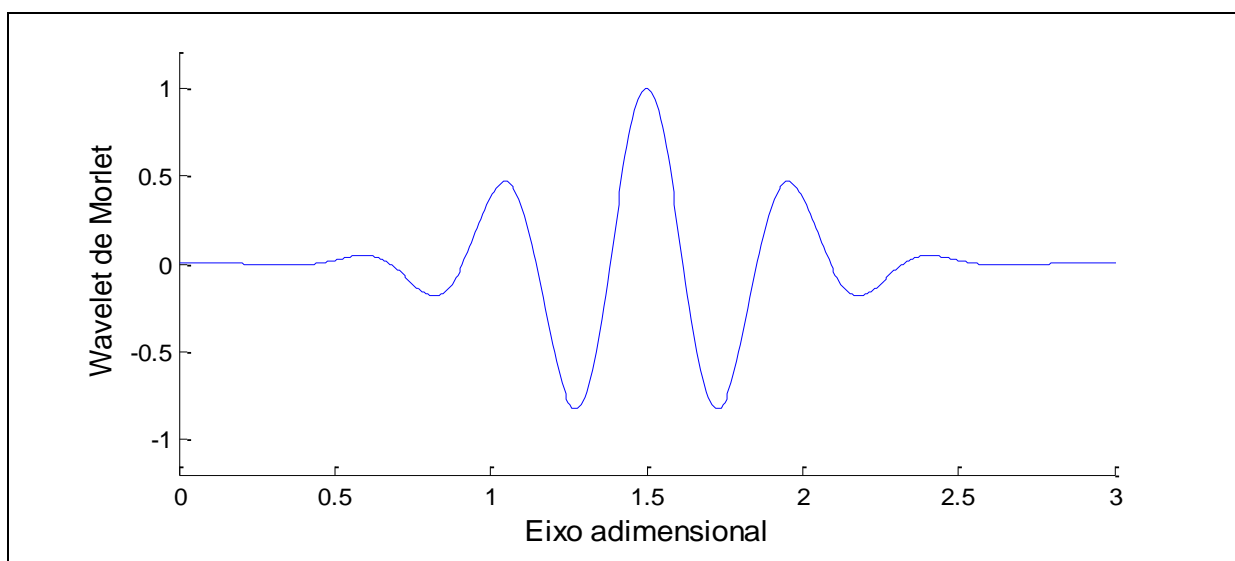


Figura 17: *Wavelet* de Morlet.
Fonte: Gerada com MATLAB®.

A família de *Wavelets* de Daubechies foi descrita, no fim da década de 80, pela pesquisadora Ingrid Daubechies e é uma das mais utilizadas na análise de sinais não estacionários ou aperiódicos (DELMONT et al., 2003). As *Wavelets* de Daubechies não são descritas por funções explícitas, mas sim criadas por métodos iterativos (OLIVEIRA, 2007). A Figura 18 mostra a família de *Wavelets* de Daubechies que, em homenagem a sua autora, são nomeadas por “db” seguidas por um número “N” que corresponde à ordem da *wavelet*.

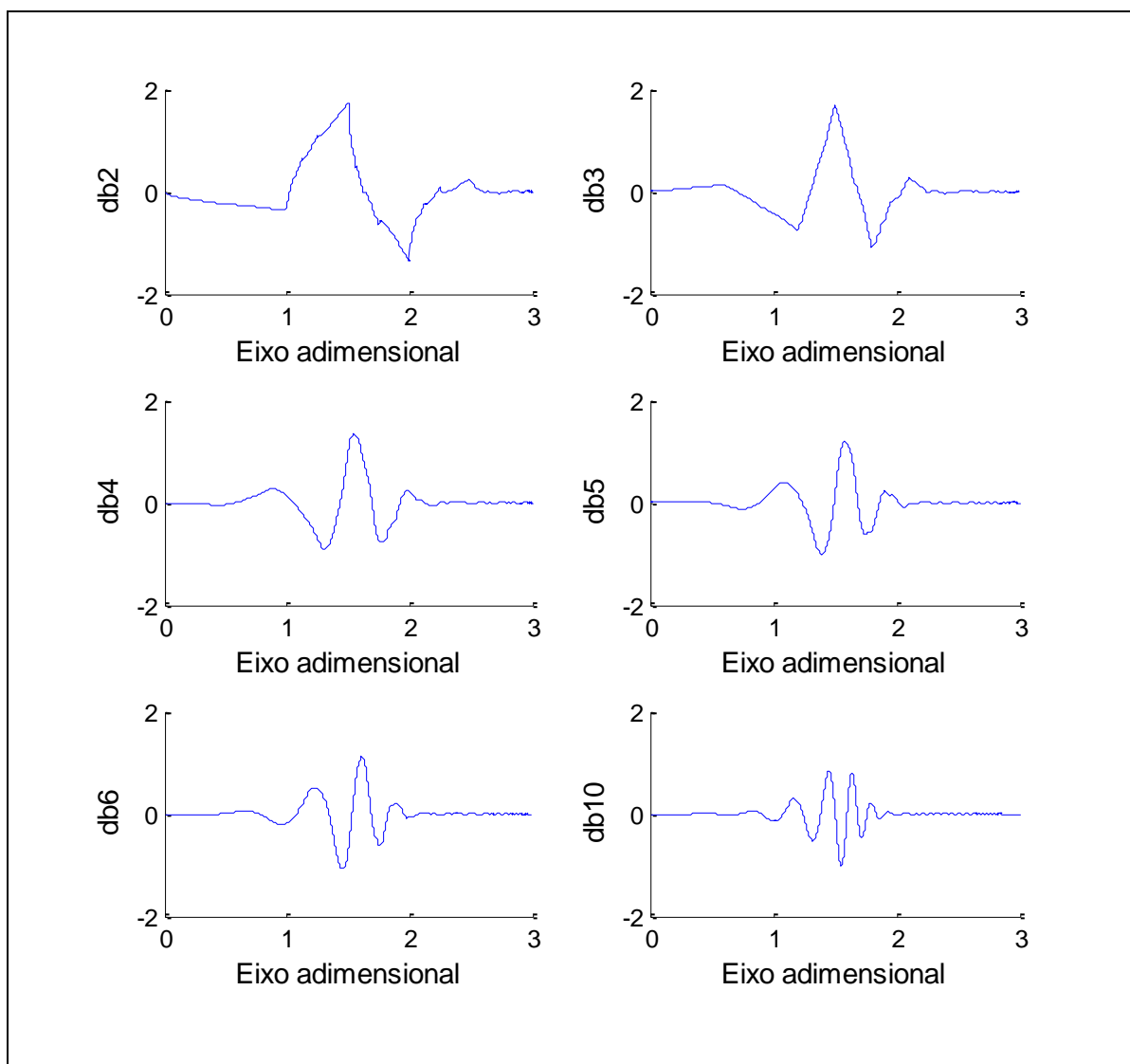


Figura 18: *Wavelets* de Daubechies.
Fonte: Gerada com MATLAB®.

Existem vários tipos de *wavelets* citados na literatura. O uso de uma ou outra está associado à aplicação. Regras para construção de *wavelets* estão sendo

propostas por vários pesquisadores, segundo as restrições e necessidades de cada aplicação. Podem-se gerar *wavelets* diferentes, e construir conjuntos de *wavelets* adequados ao processamento de um tipo de sinal ou aplicação específica, levando à obtenção de resultados melhores. A gama de possibilidades para *wavelets* é infinita e muitas famílias já foram propostas para diferentes finalidades. O Quadro 2 cita algumas das famílias de *wavelets* mais conhecidas e difundidas na literatura atual.

Sigla de representação da família	Nome da família de <i>wavelet</i>
haar	<i>Wavelet</i> de Haar
db	<i>Wavelet</i> de Daubechies
sym	<i>Wavelet</i> Symlets
coif	<i>Wavelet</i> Coiflets
bior	<i>Wavelet</i> Biortogonal
gaus	<i>Wavelet</i> Gaussiana
mexh	<i>Wavelet</i> Mexicana
meyr	<i>Wavelet</i> de Meyer
morl	<i>Wavelet</i> de Morlet

Quadro 2: Famílias de *wavelets*.

Fonte: Adaptado de (MISITI et al., 2014).

3.2.3 A transformada *wavelet* discreta - DWT

A WT em sua forma contínua (CWT) é útil essencialmente para estudos teóricos, deduções e verificações de suas propriedades. Para aplicações práticas a discretização da WT é mais eficiente e permite a sua implementação computacional.

Na Transformada *Wavelet* Discreta (DWT – *Discrete Wavelet Transform*) os parâmetros de dilatação e translação não variam continuamente, como no caso da transformada contínua, mas sim discretamente. Em certas aplicações, incluindo aquelas em análise de sinais, podem-se restringir os valores dos parâmetros a e b (da equação 5) a uma grade discreta, fixando um passo de dilatação a_0 e um passo de translação b_0 . A equação (11) mostra a forma discreta da transformada em comparação com a forma contínua, primeiramente discretizando apenas os parâmetros de escala e translação (a e b) e depois discretizando também a variável independente (tempo). (DAUBECHIES, 1992)

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \Rightarrow \Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right)$$

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \Rightarrow \Psi_{m,n}[k] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Psi\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right)$$

Onde:

m e n são inteiros;

$a_0 > 1$: parâmetro de escala ou dilatação fixo;

b_0 : parâmetro de tempo ou translação fixo;

t : variável independente contínua.

k : variável independente discreta.

(11)

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

Uma maneira eficiente de aplicar esta transformada é através de filtros, técnica desenvolvida por Mallat em 1989, onde se tem a decomposição da *wavelet* implementando a análise multiresolução. A análise multiresolução é uma técnica que permite analisar sinais em múltiplas bandas de frequências (MALLAT, 1989).

3.2.4 Análise multiresolução - AMR

A Análise Multiresolução (AMR), também conhecida como algoritmo de Mallat, é um método para implementação da DWT. O detalhamento da relação entre a DWT e a AMR extrapola o escopo deste estudo e pode ser consultado em (MALLAT, 1989), (WEEKS, 2012), (MIX e OLEJNICZAK, 2003) e (OLIVEIRA, 2007).

A transformada pelo método multiresolução obtêm “aproximações” e “detalhes” de um determinado sinal através da passagem deste por um filtro passa-alta e outro filtro passa-baixa. As características desses filtros são provenientes da *wavelet* mãe escolhida. O filtro passa-alta produz os coeficientes de detalhe e o filtro passa-baixa produz coeficientes de aproximação da decomposição do sinal. Este processo de decomposição *wavelet* por meio de filtros é ilustrado na Figura 19 (PARRAGA, 2002).

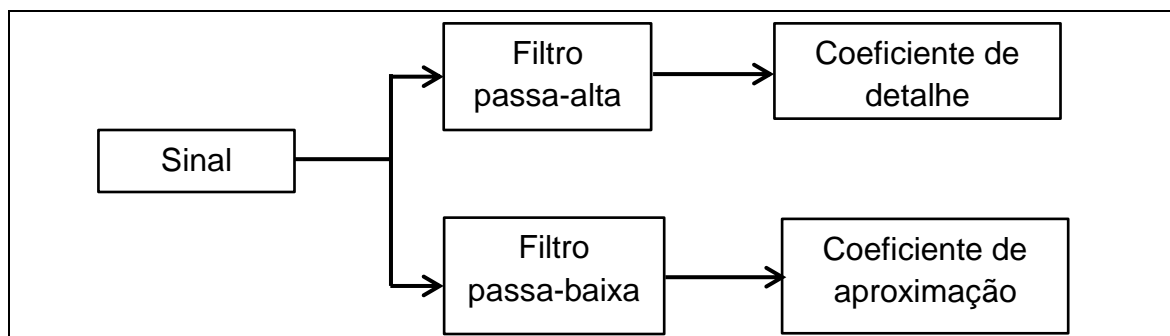


Figura 19: Decomposição wavelet com filtros.
 Fonte: Adaptado de (PARRAGA, 2002).

O coeficiente de aproximação é uma representação de baixa frequência do sinal original e o coeficiente de detalhe é a diferença entre dois coeficientes de aproximação sucessivos. A aproximação tem a mesma tendência geral do sinal original e o detalhe mostra as componentes de alta frequência (SILVA, DUARTE e VILLAREAL, 2011).

Os filtros utilizados na AMR têm como características filtrar e reamostrar o sinal. A reamostragem, ou *downsample*, diminui a taxa de amostragem original do sinal, eliminando pontos intercalados. Reamostrar por um fator dois significa que a cada dois pontos um é eliminado. O resultado é um sinal com metade do número de amostras do original, onde uma amostra “n” do sinal reamostrado corresponde à amostra “2n” do sinal original, porém o instante de tempo associado a essa amostra é o mesmo (PARRAGA, 2002).

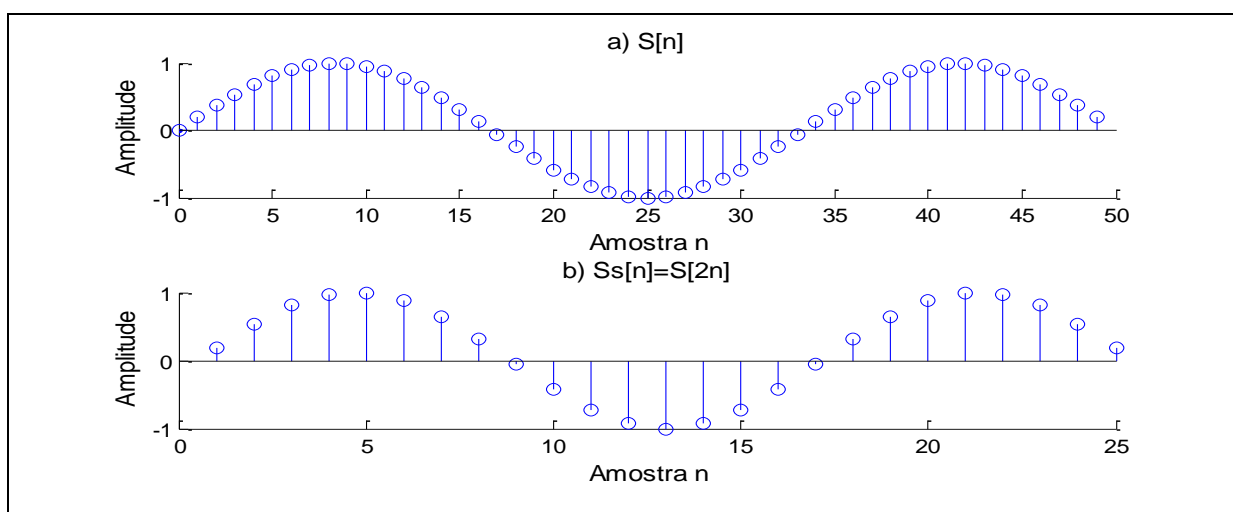


Figura 20: Exemplo de *downsample*. a) Sinal original. b) Sinal reamostrado.
 Fonte: Adaptado de (MIX e OLEJNICZAK, 2003).

O *downsample* pode ser realizado alterando a referência da variável independente em um sinal $S[n]$ para $[2n]$ tal que resulta em um sinal $Ss[n]$ comprimido como exemplifica a Figura 20 (MIX e OLEJNICZAK, 2003).

O processo de decomposição *wavelet* da análise multiresolução corresponde a uma decomposição em sub-bandas, que pode ser implementada com um banco de filtros que realizam uma sucessiva decomposição e reamostragem nos coeficientes de aproximação. Não há perda de informações na decomposição, pois cada coeficiente de detalhe armazena as informações que são gradativamente retiradas do sinal através da reamostragem. Através do processo ilustrado na Figura 21, e que também é chamado de árvore de decomposição *wavelet*, obtêm-se uma análise aproximada de todo o espectro de frequências. Ao final do processo o sinal original pode ser remontado pela soma de todos os coeficientes de detalhe e aproximação obtidos. (SILVA, DUARTE e VILLAREAL, 2011).

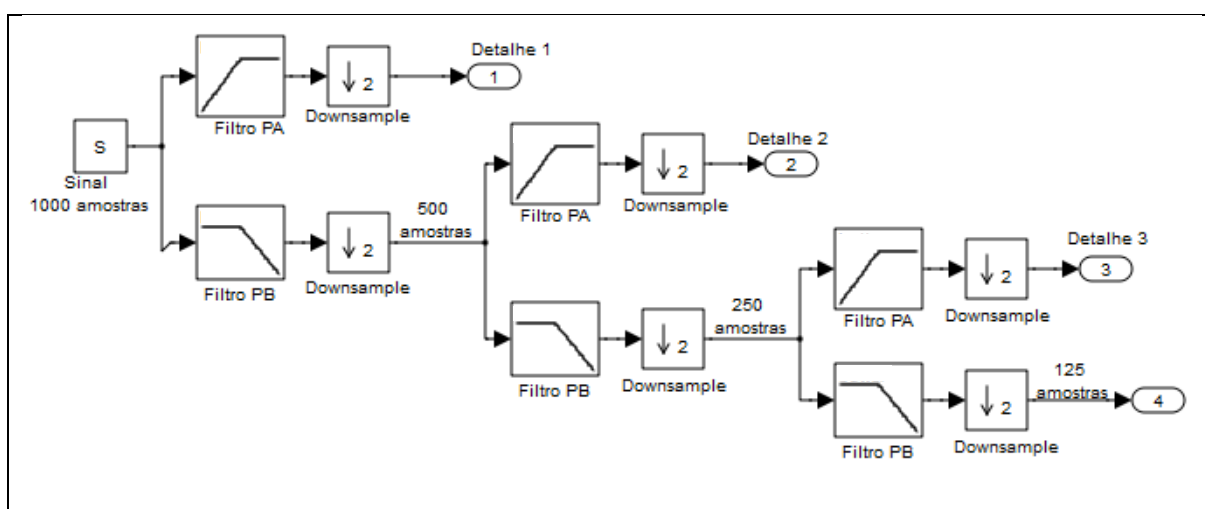


Figura 21: Decomposição com banco de filtros.

Fonte: Autoria própria.

Em termos de álgebra linear a decomposição com banco de filtros cria uma sequência de espaços vetoriais aninhados, ou subconjuntos, de tal maneira que cada etapa da filtragem corresponde a um *zoom* no sinal original, como exemplifica a Figura 22.

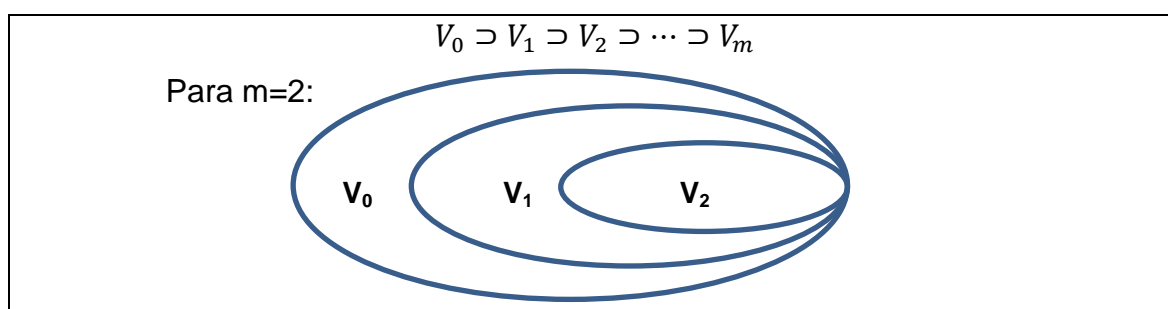


Figura 22: Decomposição por banco de filtros na forma de espaços vetoriais.

Fonte: Adaptado de (PARRAGA, 2002).

3.2.5 Aplicação

A fim de exemplificar, uma análise *wavelet* foi aplicada no mesmo registro de oscilografia usado na análise por meio da STFT na Figura 13. Este registro é um sinal de tensão registrado durante uma desenergização de um gerador, onde a tensão decresce lentamente. Na sequência deste tópico são mostrados alguns gráficos e figuras que auxiliam na compreensão do método. Para realizar a análise foi utilizado o *Wavelet Toolbox* do MATLAB®.

A *wavelet* mãe empregada nesse exemplo de análise é a Daubechies de 5ª ordem (db5). A família de *wavelets* Daubechies de 3ª, 4ª, 5ª e 6ª ordem são as mais empregadas na análise de sinais não estacionários (DELMONT et al., 2003). A decomposição foi aplicada cinco vezes nos coeficientes de aproximação, ou seja, até o quinto nível, produzindo cinco coeficientes de detalhes. A Figura 23 mostra a árvore *wavelet* da análise realizada.

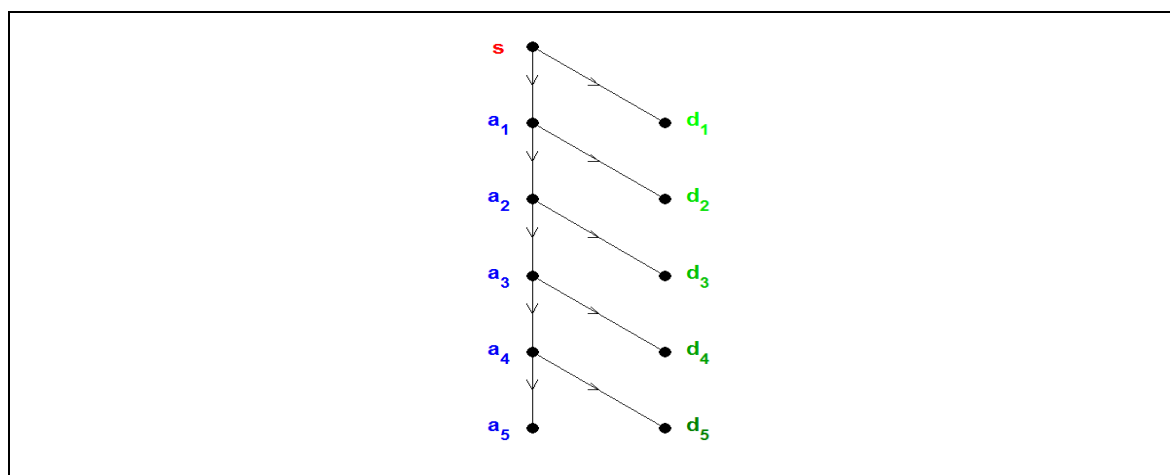


Figura 23: Árvore de decomposição *wavelet* até o quinto nível.
Fonte: (MISITI et al., 2014).

Através da representação dos coeficientes de detalhes em escala de cores da Figura 24 pode-se visualizar a ocorrência da escala máxima coincidindo com o instante de mudança abrupta no sinal original.

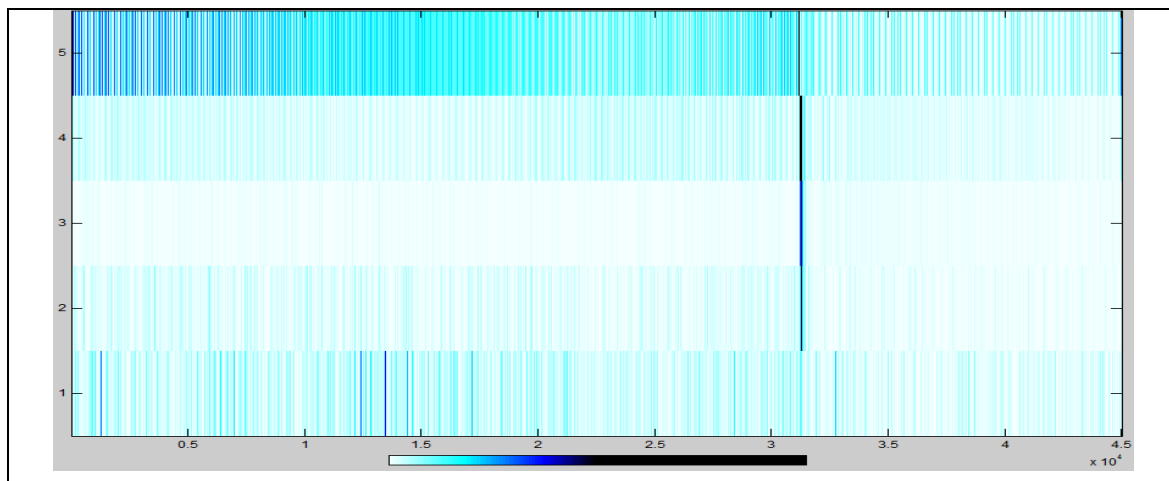


Figura 24: Visualização da magnitude dos coeficientes de detalhe por escala de cores.
Fonte: Obtida com *Wavelet Toolbox*.

Através da visualização da magnitude dos coeficientes de detalhes, os quais representam altas frequências, é possível identificar quais amostras contém informações de variações bruscas no sinal original. A Figura 25 mostra os coeficientes de maneira separada. Observando os coeficientes de detalhes percebe-se que estes tem predominância de magnitude quase nula, com exceção para a proximidade do instante que ocorre a variação do sinal original, quando apresentam um pico de magnitude.

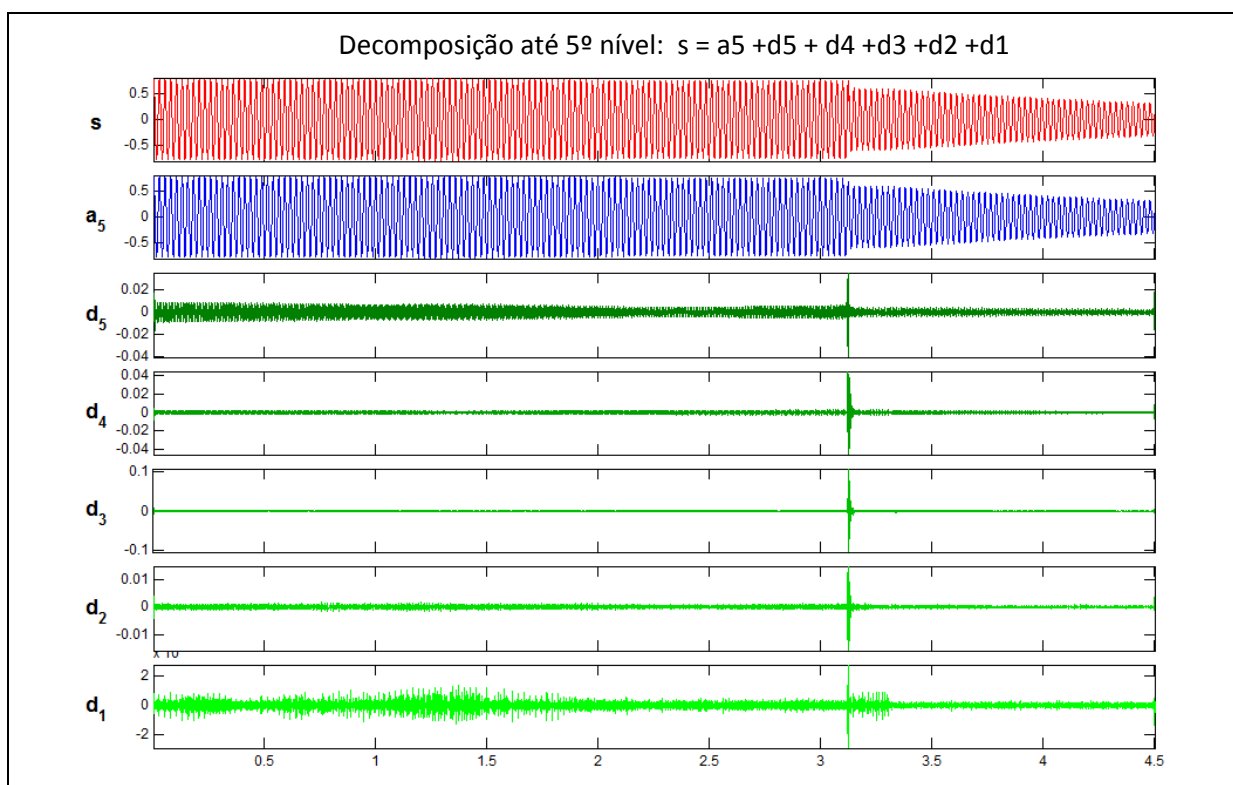


Figura 25: Visualização da magnitude dos coeficientes de detalhe.
Fonte: Obtida com *Wavelet Toolbox*.

Fica evidenciada a possibilidade de utilizar as informações dos coeficientes de detalhes para determinar os instantes de ocorrências de perturbações nos sinais de oscilografias, permitindo realizar a segmentação desses em antes, durante e depois de uma perturbação (UKIL e ZIVANOVIC, 2007). O capítulo 4 explicará o método proposto para realizar essa segmentação em sinais de oscilografias de unidades geradoras. No capítulo 5 são realizados testes e simulações a fim de determinar dentre a família Daubechies a *wavelet* mãe mais adequada para aplicação ao sinais de oscilografias de unidades geradoras contendo registros de faltas e em quantos níveis decompor estes sinais.

4. MÉTODO PROPOSTO: DETECÇÃO E SEGMENTAÇÃO

Diversas publicações são citadas nas seções anteriores, mostrando que a análise de oscilografias tem sido amplamente pesquisada, com diversos enfoques. Porém, através da revisão bibliográfica, pôde-se observar que há deficiência de pesquisas com foco específico na análise de oscilografias de unidades de geração. Desta forma este trabalho irá delimitar-se a estudar faltas em unidades de geração através da análise de registros oscilográficos de curta duração obtidos a partir de RDPs instalados em usinas do SIN.

Define-se como cenário de trabalho para o método proposto a existência de um centro de análise que através de uma rede de coleta de registros permita o acesso aos dados de RDPs de diversas usinas geradoras de energia elétrica. O principal insumo para o método de análise proposto são os registros de oscilografia de curta duração dos RDPs.

4.1 VISÃO GERAL

Propõe-se a divisão do problema em partes, abordando assim cada parte como uma etapa e propondo para cada uma a solução mais adequada.

A Figura 26 mostra como o problema foi dividido e assim fornece uma visão geral do método proposto, na forma de fluxograma. A etapa inicial consiste na coleta dos dados dos RDPs e para efeito desta pesquisa admite-se a existência de uma rede de coleta já operacional e que disponibiliza os registros de oscilografia para serem submetidos ao método de análise aqui proposto. Após a leitura do registro de curta duração, os sinais de corrente e tensão são processados, buscando detectar instantes de ocorrência de transitórios. Com a detecção dos instantes de transitório segmenta-se o sinal em antes e depois da falta ou em antes, durante e depois quando a duração do transitório for considerável. A seguir realiza-se a extração de características relevantes dos sinais em cada segmento e por último, utilizando as características extraídas, faz-se a classificação da falta gerando um conjunto de informações como saídas.

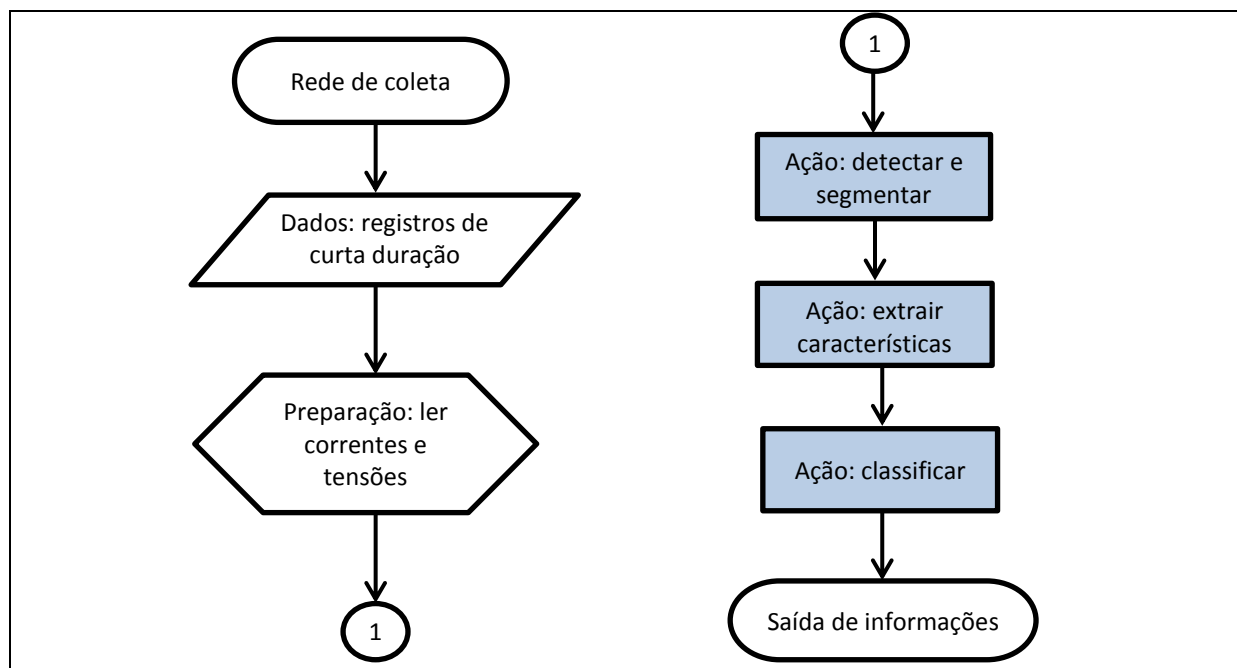


Figura 26: Fluxograma do método proposto: visão geral.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 26 a “**leitura das correntes e tensões**” é uma etapa de preparação que consiste em abrir os arquivos no formato COMTRADE, identificar os canais do registro que contém dados referentes as correntes e tensões da mesma unidade geradora e ler estes dados convertendo-os para o formato adequado ao processamento computacional. As três etapas de ação são descritas nas seções seguintes onde fica explicitado o método proposto.

4.2 DETECÇÃO DAS FALTAS E SEGMENTAÇÃO DOS REGISTROS

Esta etapa consiste da leitura e interpretação dos registros de oscilografias gerados pelos RDPs por meio de algoritmos. Para a realização dos testes deste estudo os algoritmos foram desenvolvidos em MATLAB[®], porém a metodologia pode ser posta em prática em qualquer linguagem de programação. Os registros devem ser interpretados e os sinais das tensões e correntes processados por meio de técnicas de PDS. São detectados os instantes em que ocorreram os transitórios ou mudanças de estado operativo e o registro é então segmentado em antes, após e durante a falta. É empregada a transformada *wavelet* como técnica de

PDS e através do cálculo da energia dos coeficientes de detalhe *wavelet* detecta-se a ocorrência de falta bem como os seus instantes.

Para a detecção do instante da ocorrência de transitório uniu-se o método proposto por Costa (2010) com o “*universal threshold*” proposto por Ukil e Zivanovic (2006). Costa propôs a utilização da variação da energia dos coeficientes de detalhe da DWT e detectar o instante da ocorrência de transitórios no sinal baseado na comparação com um limiar fixo. Ukil e Zivanovic utilizaram como limiar o *universal threshold*, que leva em consideração o desvio padrão de um sinal, calculado diretamente sobre o coeficiente de detalhe (UKIL e ZIVANOVIC, 2006). Ambos os métodos foram originalmente propostos para análise de oscilografias de sistemas de transmissão de energia e neste trabalho são adaptados para unidades de geração.

O cálculo da energia dos coeficientes de detalhe é feito através da integral discreta das amostras dos coeficientes, conforme mostra a equação (12).

<p>Energia do sinal original:</p> $E = \sum_{k=1}^{k=n} I_{[k]} ^2$ <p>Energia dos coeficientes de detalhe:</p> $E_{d_j} = \sum_{k=1}^{k=n/2^j} d_{j[k]} ^2$ <p>Variação instantânea da energia para a amostra k:</p> $\Delta E_{d_j k} = d_{j[k]} ^2$ <p>Onde: I: sinal original; n: número de amostras do sinal original; k: índice da amostra atual; d_j: coeficiente de detalhe; $j[k]$: índice do coeficiente de detalhe;</p>	(12)
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

Fonte: (COSTA, 2010)

A Figura 27 mostra a variação da energia para o coeficiente de detalhe $cd3$ em comparação com os valores assumidos pelo coeficiente para as amostras próximas do momento da falta. A energia total do sinal é obtida pela somatória da equação (12), porém o importante para a análise é o comportamento da energia ou a variação da mesma. O terceiro gráfico da Figura 27 (ΔE_{cd3}) é obtido calculando a potência de cada amostra do coeficiente que plotada ao longo do conjunto das

amostras exibe o perfil de variação da energia do respectivo coeficiente de detalhe, o que é realizada pelo quadrado do valor de cada amostra.

A energia dos coeficientes sofre uma variação brusca no momento da ocorrência de transitórios no sinal original e, de acordo com Costa (2010), a identificação deste pico de aumento da energia é uma forma apropriada para a determinação do instante de ocorrência do transitório e consequentemente da falta.

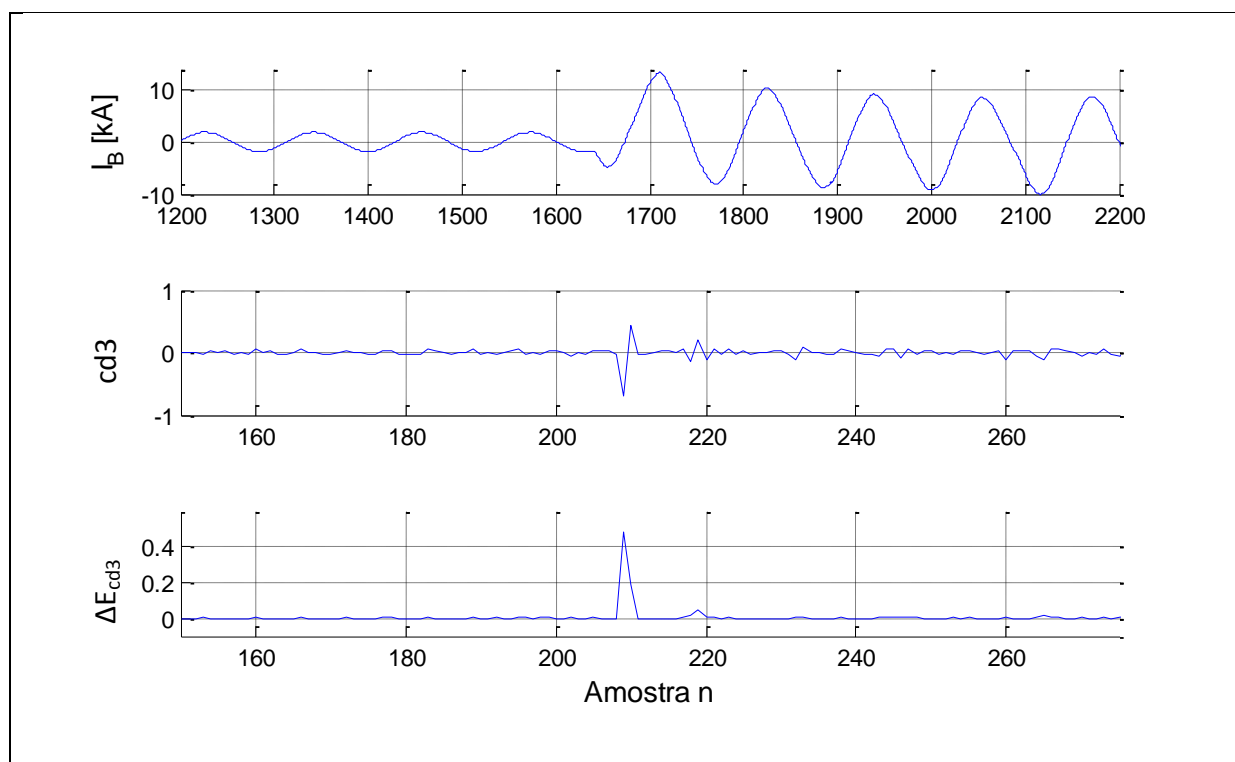


Figura 27: Variação da energia do coeficiente de detalhe $cd3$.
Fonte: Autoria própria.

A comparação da variação da energia para amostras sucessivas do coeficiente, ou ainda uma janela de coeficientes, pode ser usado para determinar o instante de ocorrência de transitórios no registro em análise. Costa (2010) utilizou como limiar, para considerar um aumento brusco de energia, que o acréscimo da energia de uma amostra seja no mínimo três vezes maior que o valor da quarta amostra anterior (janela de quatro amostras). Porém nos testes realizados foi identificado que pode ocorrer a identificação de instantes de transitórios originários de distúrbios relacionados a QEE e não relacionados a faltas. Os distúrbios de QEE também provocam variações bruscas na energia dos coeficientes *wavelets*, porém, diferentemente dos objetivos do trabalho de Costa (2010), não fazem parte do

escopo de interesse desta pesquisa. Nestes casos a variação máxima alcançada pela energia dos coeficientes é relativamente pequena quando comparada ao valor máximo para casos de desligamento forçado.

Para detectar o ponto de transitório, ou momento da falta, através da variação da energia dos coeficientes de detalhe propõem-se o uso de um limiar que seja relativo ao valor máximo alcançado durante o registro e que considere dados estatísticos do comportamento do sinal. Trata-se do *universal threshold* proposto por Ukil e Zivanovic (2006). O *universal threshold* ou **limiar universal**, em uma tradução livre, é calculado sobre a variação da energia dos coeficientes de detalhe conforme a equação (13). O desvio padrão consiste em uma medida da dispersão de um sinal, mostrando o quanto de variação existe em relação à média, tornando assim o *universal threshold* um limiar com base estatística. O sinal de variação da energia do coeficiente de detalhe *wavelet* cujo *universal threshold* possui maior valor, obtido de acordo com a equação (13), é selecionado para fazer a detecção e neste sinal cada vez que o valor do *universal threshold* é ultrapassado detecta-se a ocorrência de um transitório.

Cálculo do *universal threshold* ou limiar universal:

$$T = \sigma \sqrt{\log_e n}$$

(13)

Onde:

σ : desvio padrão;

n : número de amostras do coeficiente de detalhe.

Fonte: (UKIL e ZIVANOVIC, 2006).

Assim quando o *universal threshold* for ultrapassado determina-se em qual amostra ocorreu o transitório. Para identificar o instante de tempo relacionasse a amostra com o tempo associado a esta amostra, fornecido pela oscilografia. Devido ao processo de *downsample*, como mostra a Figura 20, o coeficiente cd_2 possui quatro vezes menos amostras que o sinal original. Assim determinasse o instante de tempo no sinal original multiplicando-se o índice da amostra do

coeficiente por quatro. Portanto, para o coeficiente cd2 o instante corresponde ao índice $t_{[4k]}$ e para o coeficiente cd3 a $t_{[8k]}$, conforme generaliza a equação (14).

Instante de ocorrência do transitório no sinal analisado:

$$It = t_{[2^j * k]}$$

Onde:

It : Instante do transitório;

t : Vetor de tempo da oscilografia;

k : índice da amostra identificada como início do transitório;

j : índice do coeficiente de detalhe;

2: fator de *downsample*.

(14)

Fonte: Autoria própria.

A Figura 28 mostra o aumento da energia do coeficiente cd3 no momento da falta em comparação com o *universal threshold* calculado para o coeficiente de detalhe 3 de um sinal de tensão decomposto com *wavelet* mãe Daubchies de quarta ordem.

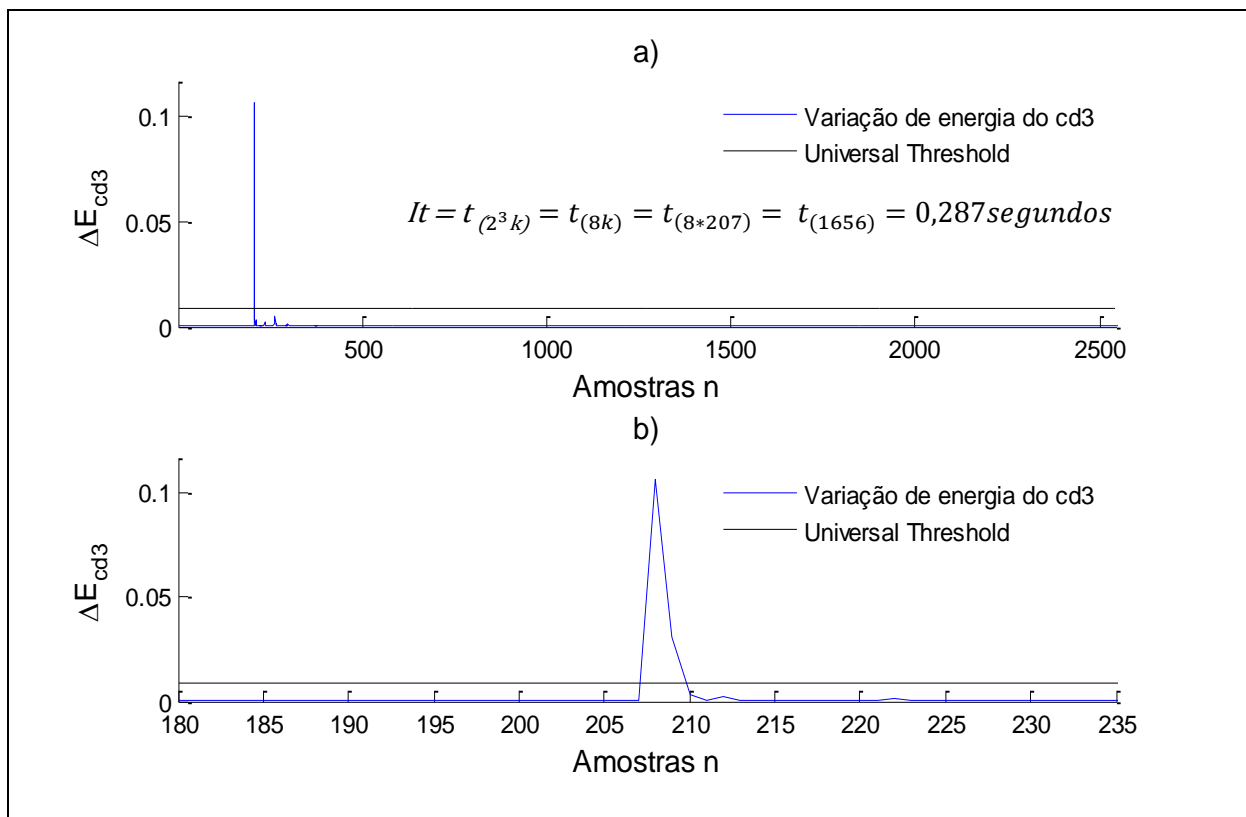


Figura 28: Aumento brusco da energia do coeficiente de detalhe cd3: a) em todo o sinal; b) zoom no momento da falta.

Fonte: Autoria própria.

A partir da determinação do instante que ocorreu a falta pode-se proceder com a segmentação do registro em pré falta e pós falta como exemplifica a Figura 29. Na Figura 29 as barras verticais identificam o fim de um segmento e início de outro. Os segmentos pré falta e pós falta estão sinalizados e o trecho entre as duas barras verticais corresponde ao segmento de falta.

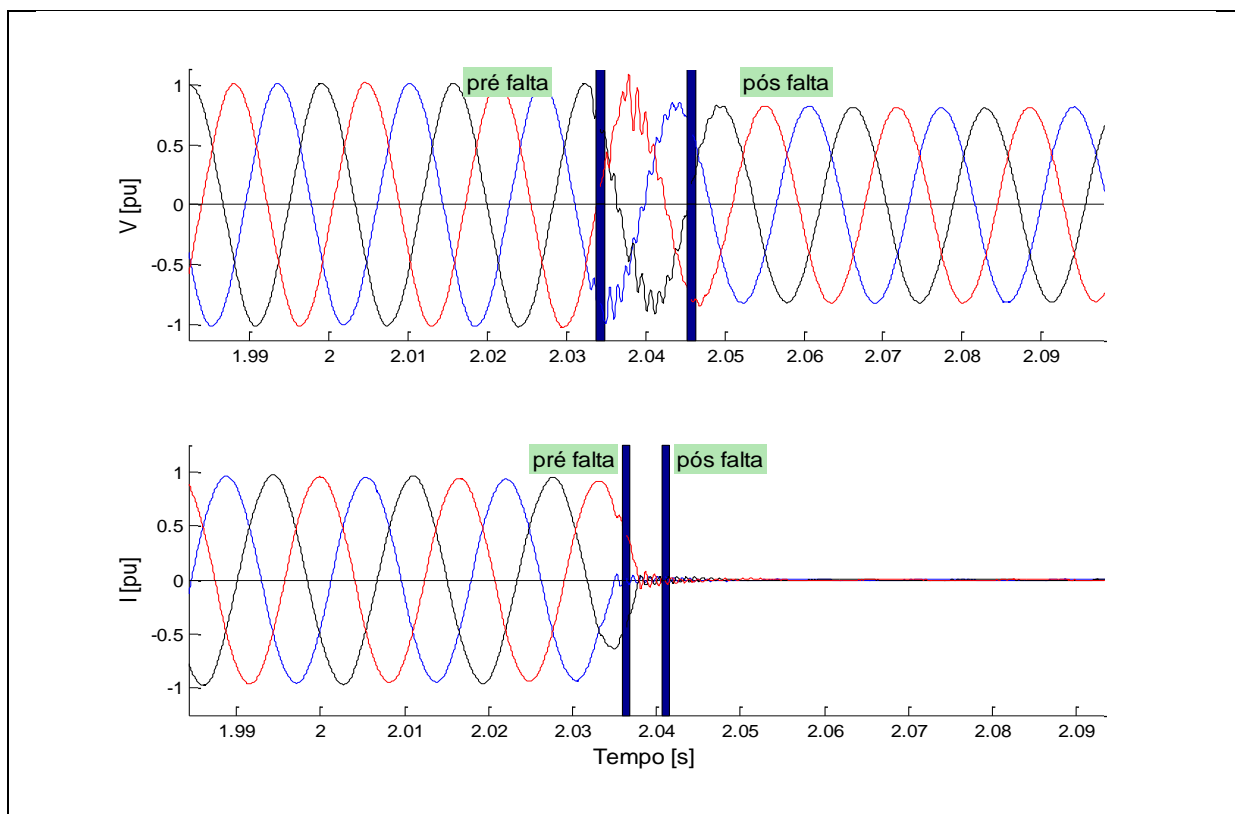


Figura 29: Detalhe da segmentação
Fonte: Autoria própria.

Em alguns casos, quando a duração do segmento durante a falta for muito pequeno, este pode ser descartado e utilizar apenas os segmentos pré e pós falta na etapa de extração de características. O registro também poderá conter informações de transitórios consecutivos, característicos de faltas evolutivas.

O ONS especifica através dos procedimentos de rede os requisitos mínimos de tempo de eliminação de faltas e também para atuação das proteções de retaguarda. O requisito para os sistemas de proteção de barramentos da rede básica (aos quais as unidades geradoras são conectadas) eliminar totalmente uma falta é de até 100 ms para tensões nominais superiores a 345 kV e 150 ms para níveis de tensões nominais inferiores a 345 kV, incluindo o tempo de atuação da proteção, dos relés auxiliares e o tempo de abertura dos disjuntores. Considerando uma falha de abertura dos disjuntores, nas mesmas instalações o tempo total para eliminação de

faltas deve ser de no máximo 250 ms em tensões nominais superiores a 345 kV e 300 ms para níveis de tensões nominais inferiores a 345 kV. (ONS, 2011).

Neste trabalho, transitórios consecutivos com intervalo menor que 200ms são considerados como parte do mesmo segmento de falta. Os sinais são divididos em mais segmentos dependendo do número de transitórios detectados, desde que o tempo entre transitórios seja maior que 200ms (duzentos milésimos de segundos). Desta maneira somente são considerados mais de um segmento quando ocorrer uma evolução da falta, por exemplo, um curto-circuito na linha de interligação com o SIN pode evoluir para defeito no transformador elevador.

Para a decomposição dos sinais através da DWT optou-se pelo uso da família de *wavelets* mãe Daubechies por ser adotada em referências bibliográficas consultadas. A escolha da ordem da *wavelet* mãe Daubechies a ser utilizada e do nível de decomposição é feita no capítulo 5. Neste são realizados testes comparativos com diferentes ordens e coeficientes de detalhe.

Porém a aplicação da decomposição pela DWT, por exemplo, até o terceiro nível de detalhe, em um sinal trifásico (três tensões e três correntes) produz um total de dezoito coeficientes de detalhe, gerando uma necessidade adicional de tratamento de dados. Para minimizar essa necessidade de processamento adicional propõem-se a aplicação da transformada de Clarke-Concórdia, ou transformada alfa-beta, aos sinais de tensão e corrente, transformando o sistema trifásico em um sistema bifásico equivalente. A transformada de Clarke-Concórdia consiste em uma transformação linear que leva os sinais trifásicos para uma base ortogonal alfa-beta, mantendo a potência instantânea, como mostra a Figura 30 (GUAN e KEZUNOVIC, 2011).

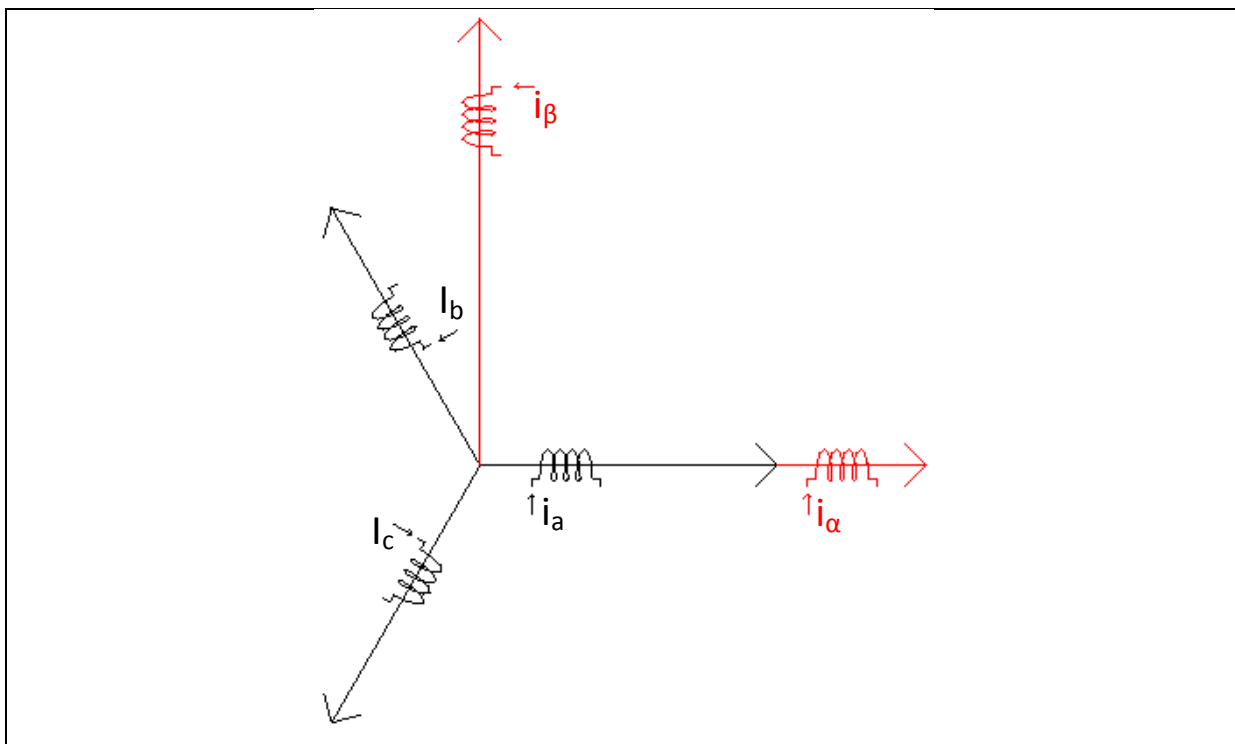


Figura 30: Transformada de Clarke-Concórdia.

Fonte: Adaptado de (ZHU, SHI e DAN, 2009)

A mudança de base ou transformação linear da transformada de Clarke-Concórdia é obtida através da multiplicação por uma matriz constante, conforme mostra a Equação (15).

Transformada de Clarke:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha(t)} \\ i_{\beta(t)} \\ i_{0(t)} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}$$

Onde:

$i_{\alpha(t)}$: Corrente alfa;

$i_{\beta(t)}$: Corrente beta;

$i_{0(t)}$: Componente de corrente homopolar nula;

$i_a(t)$: Corrente fase a;

$i_b(t)$: Corrente fase b;

$i_c(t)$: Corrente fase c;

Fonte: (GUAN e KEZUNOVIC, 2011)

(15)

Como os sinais alfa e beta, obtidos pela transformada de Clarke-Concórdia, são ortogonais, como mostra a Figura 30, é possível calcular o módulo desses sinais e assim obter um sinal único que contém informações dos três sinais do sistema trifásico original (ZHU, SHI e DAN, 2009). A aparência desse sinal pode ser vista na Figura 31. A componente homopolar da transformada de Clarke-Concórdia apresenta valor nulo sempre que não houver circulação de corrente pela terra, o que é característico em geradores sem aterramento ou com aterramento de alta impedância. Por isso esta componente não é utilizada na segmentação, mas será utilizada na etapa de extração de características, pois pode auxiliar a classificação.

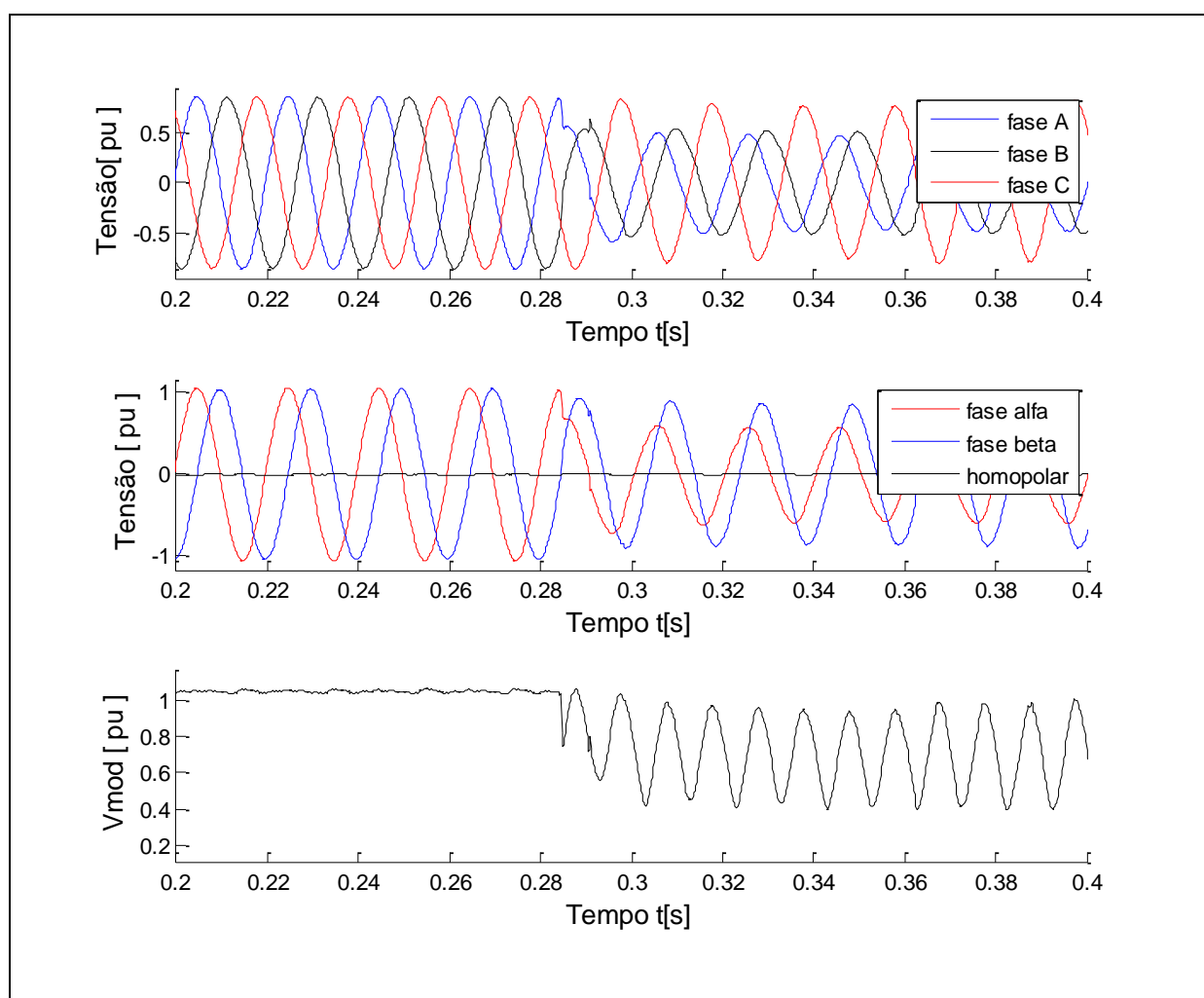


Figura 31: Aplicação da transformada de Clarke-Concórdia.
Fonte: Autoria própria.

Desta forma têm-se um único sinal representativo das três fases e pode-se proceder a identificação dos momentos de ocorrência dos transitórios e a realização da segmentação das tensões e correntes de maneira independente. A

aplicação da DWT ao módulo dos sinais alfa e beta é então possível e produz apenas três coeficientes de detalhe, os quais podem ser utilizados para o cálculo do *universal threshold*. A escolha do *universal threshold* de maior amplitude, entre os três consiste no método proposto para escolha do coeficiente de detalhe *wavelet* a ser usado na etapa de segmentação.

O método proposto para a identificação dos transitórios e segmentação é resumido através do fluxograma da Figura 32.

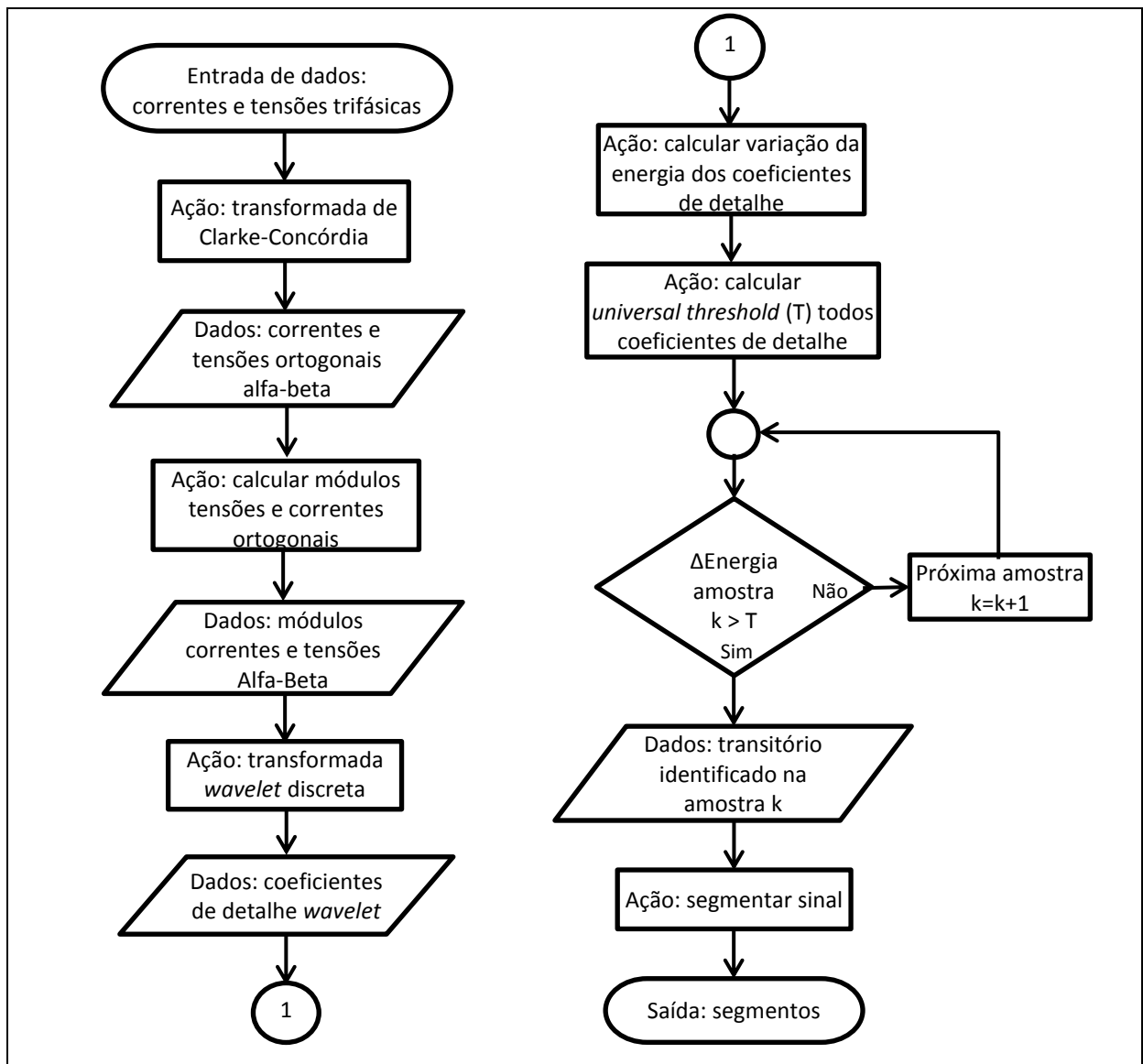


Figura 32: Método proposto: detecção de transitórios e segmentação.
Fonte: Autoria própria.

Através dos resultados obtidos nos estudos de caso definiu-se por realizar a segmentação com base nos sinais de tensão da unidade geradora, sempre que esta estiver disponível no registro. Após a segmentação a próxima etapa é a extração de características que serão utilizadas no diagnóstico.

4.3 EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS

Feita a segmentação dos registros passa-se para a extração de características dos segmentos definidos. Em cada segmento de oscilografia identificado são calculadas grandezas que visam representar os dados brutos por meio de um conjunto reduzido de informações. Um exemplo é um conjunto de amostras de sinal senoidal, se este for estacionário pode ser representado por um valor de módulo e outro de fase, independente da quantidade de amostras do registro original. Também aqui se empregam técnicas de PDS, e novamente a transformada *wavelet* pode ser empregada. Outras técnicas como a transformada de Fourier poderão ser usadas em conjunto com *wavelet* buscando extrair informações que posteriormente podem indicar a origem da falta.

As características a serem extraídas foram definidas de modo a permitir uma posterior classificação da falta de acordo com casos típicos e conhecidos de unidades geradores como curtos-circuitos. O conjunto de características pode ser ampliado, em estudos futuros, que venham a complementar este.

Características extraídas em cada segmento:

- Valores rms para cada fase da tensão;
- Valores rms para cada fase da corrente;
- Valor rms das componentes simétricas (sequência positiva, negativa e zero) para tensão;
- Valor rms das componentes simétricas (sequência positiva, negativa e zero) para corrente;

O valor rms, ou eficaz, é uma medida estatística que corresponde a raiz quadrada do valor quadrático médio (rms - *root mean square*) e pode ser obtido para um vetor de n valores pela aplicação da equação (16) (USIDA et al., 2009).

<p>Valor rms: $V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n V_k^2}$</p> <p>Onde: n: número de amostras; k: amostra atual; V_k: tensão da amostra k.</p> <p>Fonte: (USIDA et al., 2009)</p>	(16)
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

O teorema de Fortescue afirma que um conjunto de n fasores desequilibrados pode ser decomposto em n sistemas de fasores equilibrados, denominados de componentes simétricas. Quando aplicado a um sistema trifásico este teorema decompõem os sinais de fase A, B e C nos sinais em três sistemas de componentes simétricas denominadas sequência zero, sequência 1 e sequência 2, ou ainda em sequência zero, positiva e negativa, respectivamente. Como os três sistemas de sequência são equilibrados, basta realizar a análise para o sistema relacionado a uma das fases. A equação (17) mostra como obter as componentes simétricas pela multiplicação do sistema trifásico por uma matriz de transformação linear. (KINDERMANN, 2007)

Teorema de Fortescue:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

Sendo:

$$a = 1 \angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (17)$$

Onde:

V_0, V_+ e V_- : Componentes simétricas que representam respectivamente as tensões de sequência zero, positiva e negativa;

a : Operador rotacional;

V_A, V_B e V_C : tensões de fase A, B e C respectivamente.

Fonte: (KINDERMANN, 2007)

A mesma transformação linear da equação (17) pode ser aplicada aos sinais de tensões e corrente para obter as componentes simétricas e depois aplicar a equação (16) para obter os valores rms das componentes simétricas. Como mostra a equação (17) o cálculo das componentes simétricas pelo Teorema de Fortescue é realizado no plano complexo. Ghijselen e Bossche (2005) propuseram algumas simplificações geométricas que permitem obter o módulo das componentes simétricas sem a necessidade de cálculos no plano complexo, apenas com base nos

valores rms dos sinais medidos. O resultado dessas simplificações é mostrado em (18). (GHIJSELEN e BOSSCHE, 2005).

Cálculo simplificado do módulo das componentes simétricas:

Sequência zero:

$$V_0 = \sqrt{\frac{V_A^2 + V_B^2 + V_C^2 - V_+^2 - V_-^2}{3}}$$

Sequência positiva:

$$V_+ = \sqrt{\frac{A_m^2 + \frac{4 A_s^2}{\sqrt{3}}}{2}}$$

Sequência negativa:

$$V_- = \sqrt{\frac{A_m^2 - \frac{4 A_s^2}{\sqrt{3}}}{2}}$$

Onde:

Média quadrática dos lados do triângulo ABC:

$$A_m^2 = \frac{V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2}{3}$$

Superfície do triângulo ABC:

$$A_s^2 = \sqrt{p(p - V_{AB})(p - V_{BC})(p - V_{CA})}$$

Metade do perímetro do triângulo ABC:

$$p = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{2}$$

(18)

Fonte: (GHIJSELEN e BOSSCHE, 2005)

A relativa simplicidade das fórmulas apresentadas em (18) permitem a sua aplicação como uma função matemática de um processamento computacional, reduzindo a necessidade de alta capacidade de processamento e eliminando o processamento no plano complexo.

A Figura 33 ilustra o fluxograma do processo de extração de características proposto.

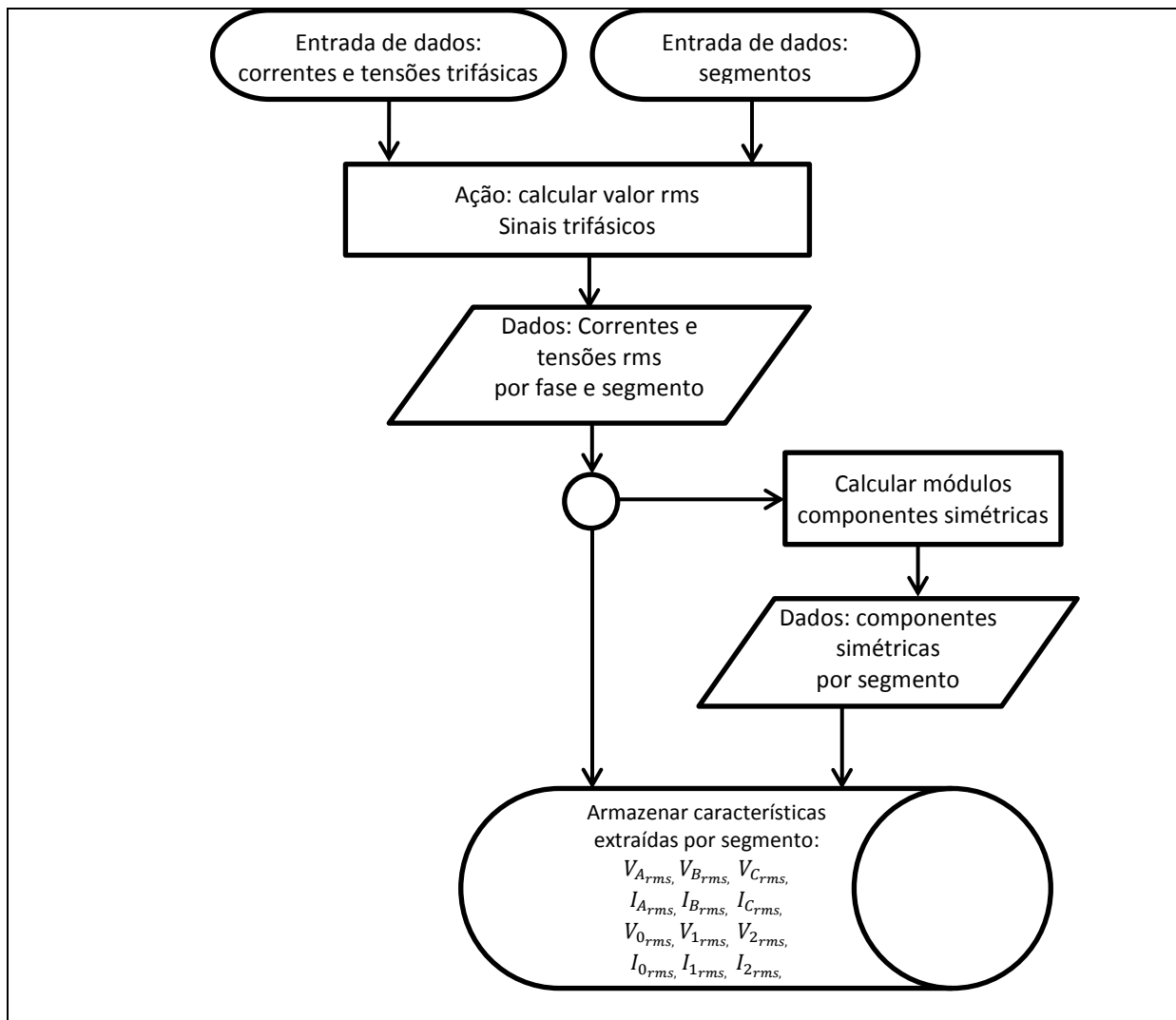


Figura 33: Método proposto: extração de características.

Fonte: Autoria própria.

Após as características extraídas estarem armazenadas estas podem ser submetidas a qualquer método de classificação.

4.4 CLASSIFICAÇÃO

As informações extraídas dos segmentos do registro podem ser submetidas a regras ou comparadas com padrões a fim de classificar a causa da falta em análise. Essa parte do problema pode ser interpretada como um problema de classificação de padrões. Utilizando uma abordagem deste tipo, podem ser aplicadas diversas ferramentas computacionais, já consolidadas, para este fim, como Redes Neurais Artificiais (RNAs), Sistemas Especialistas (SEs), Sistemas *fuzzy*, bem como outros algoritmos baseados em conceitos de estatística (CASTRO e PRADO, 2002).

O desenvolvimento de um SE tem algumas vantagens sobre outros métodos, sendo uma delas a simplicidade de desenvolvimento. Outra vantagem consta da possibilidade deste permanecer aberto, ou seja, novas regras podem ser desenvolvidas e acrescentadas ao SE aumentando a base de conhecimento do mesmo e assim melhorando o resultado. Esta opção é muito adequada considerando que o especialista humano que realiza a análise manual das oscilografias poderá contribuir com a base de conhecimentos.

Considerando que o foco principal deste trabalho é a segmentação e extração de características dos sinais, não será realizada pesquisa a fim de definir a melhor forma de classificação.

Para validar os resultados obtidos nas etapas de segmentação e extração de características os dados serão submetidos a uma classificação manual com regras propostas por Moreto (2011). No capítulo 6 são mostradas as classificações obtidas para os estudos de caso realizados.

5. AVALIAÇÃO DA WAVELET MÃE

No fluxograma da Figura 32, que resume o processo de detecção e segmentação proposto, é definido o uso da DWT como parte do método para a detecção de transitórios. Conforme explanado anteriormente a DWT consiste em uma transformação linear onde a base de transformação pode ser escolhida e é chamada de *wavelet* mãe. Diversas famílias de *wavelets* mãe têm sido estudadas e propostas, cada qual com uma ou mais aplicações. Dentre as famílias estudadas a família *Wavelet* de Daubechies é aplicada na análise de sinais não estacionários, sinais estes característicos de registros oscilográficos de faltas no sistema elétrico. As Daubechies de terceira, quarta, quinta e sexta ordem (respectivamente db3, db4, db5 e db6) também são empregadas na localização de faltas em linhas de transmissão de energia. (COSTA, 2010) (OLIVEIRA, 2007)

Com base nas referências consultadas definiu-se pelo uso da família Daubechies nesta pesquisa. A escolha da ordem da *wavelet* mãe, no entanto foi baseada em testes comparativos, os quais são explicados nos tópicos seguintes.

Como critério de escolha da ordem da *wavelet* mãe foi definido para indicador de qualidade da segmentação a diferença entre o instante inicial real e o obtido pelo método com cada ordem testada. Assim a ordem que resultar na menor diferença de tempo entre a segmentação e o instante real da falta é a melhor ordem, já que este instante é conhecido nas faltas simuladas.

5.1 MODELO DE SIMULAÇÃO

Para poder comparar os resultados de cada teste um modelo de simulação de unidade geradora foi utilizado, gerando registros simulados de faltas conhecidas e observando o índice de qualidade acima definido.

O modelo empregado na simulação corresponde a um gerador hidroelétrico, de polos salientes, com 200 MVA de potência nominal, acionado por turbina hidráulica. A saída do gerador é em 13,8 kV com ligação em estrela isolada e elevada para 230 kV por um transformador elevador trifásico ligado em triângulo no

lado de baixa tensão e estrela aterrada no lado de alta tensão. O trecho de rede isolada é aterrado por um transformador de aterramento com enrolamento em zig-zag. A Figura 34 mostra o modelo de simulação com implementação no Matlab/Simulink®, o qual representa uma instalação típica do SIN.

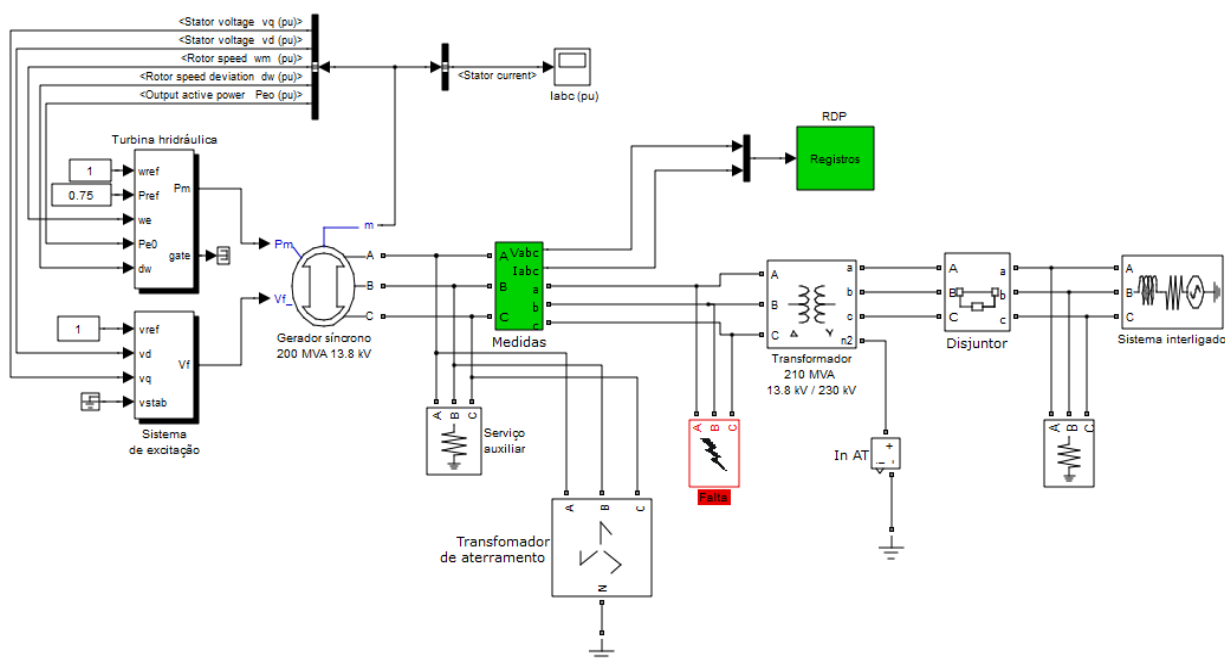


Figura 34: Modelo de simulação.
Fonte: (MORETO, 2011).

Para a simulação da falta produzir dados similares aos registros reais de oscilografias o modelo utiliza um disjuntor para isolar o gerador do sistema elétrico, o fechamento da turbina é feito zerando o sinal de torque aplicado ao gerador e o desligamento do sistema de excitação é feito zerando a tensão de campo. Desta forma os dados produzidos nas simulações têm um comportamento semelhante que dados reais quando da atuação dos sistemas de proteção que desligam uma unidade geradora.

Para facilitar na posterior comparação dos resultados da segmentação as simulações foram padronizadas. O instante de falta em todas as simulações foi em 1s, com eliminação da falta em 50 ms. O local da falta foi simulado entre o gerador e o transformador elevador e também no lado de alta tensão do transformador elevador. Os tipos de falta trifásica equilibrada, bifásicas e monofásicas foram simulados. Também foi alterado o carregamento do gerador entre simulações. O local de medição dos dados, como mostra a Figura 34, é a saída do gerador.

Nos tópicos seguintes são mostradas as comparações dos resultados com diferentes condições e segmentação com *wavelet* mãe db3, db4, db5 e db6.

5.2 ALGORITMO DE TESTES

Para possibilitar a realização dos testes de segmentação é necessário implementar o método proposto pelo fluxograma da Figura 32. A Figura 35 mostra a tela inicial do programa desenvolvido em Matlab®, para organizar o algoritmo em etapas de processamento e assim avaliar o método.

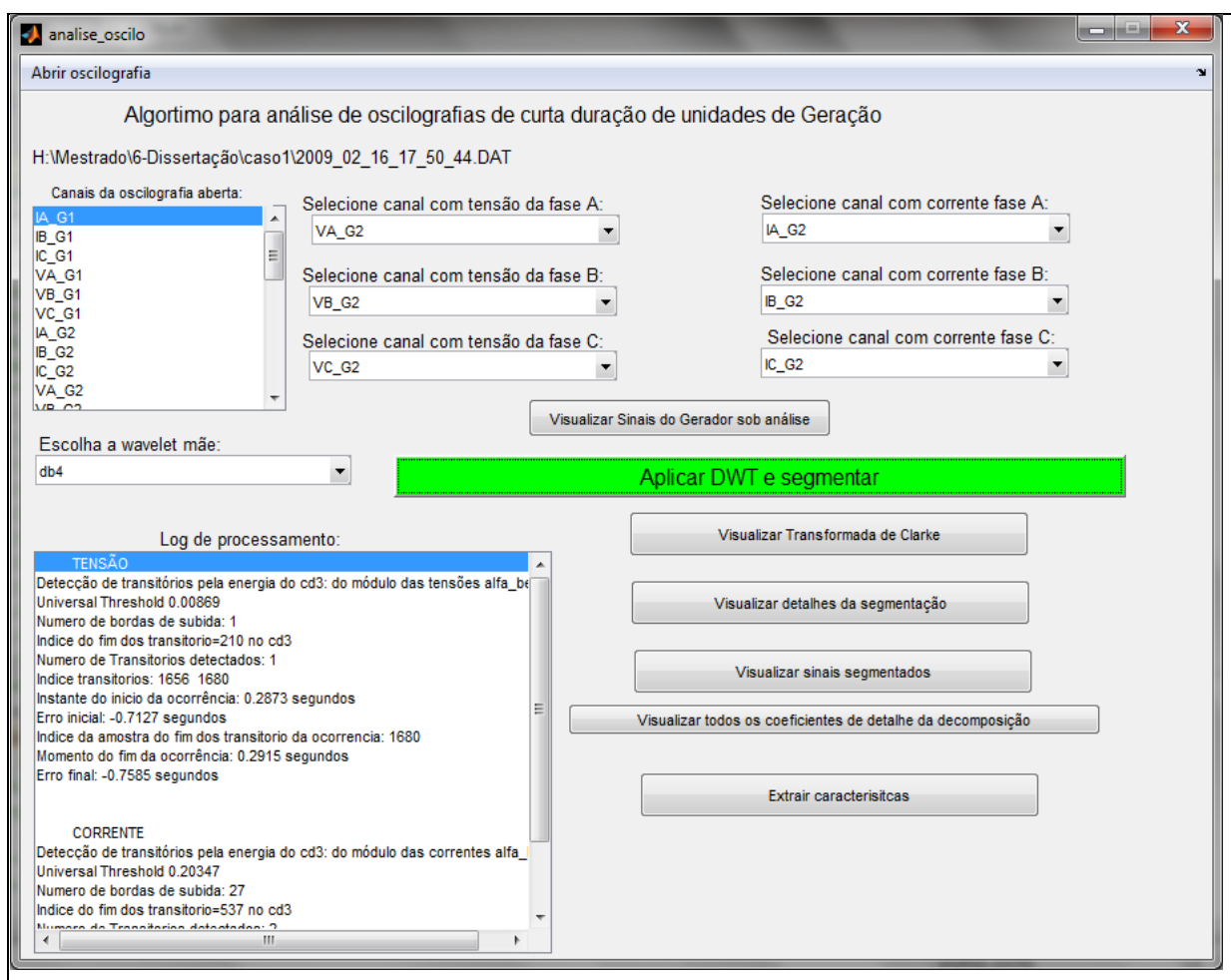


Figura 35: Tela inicial do programa “analise_oscilo” desenvolvido.

Fonte: Autoria própria.

A interface gráfica foi desenvolvida com auxílio da ferramenta “*Guide*” do Matlab® e consiste de uma função principal que invoca outras funções passando argumentos e recebendo os resultados. Através da tela inicial é possível selecionar quais os canais a serem analisados e a *wavelet* mãe usada no processamento.

5.3 CARREGAMENTO NOMINAL

Para avaliar a segmentação com diferentes *wavelets* o modelo foi ajustado para representar uma unidade geradora operando a plena carga, ou seja, tensão e corrente em 1 p.u.. Foram simuladas faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas, na saída do gerador e no lado de alta tensão do transformador elevador.

A Figura 36 mostra, como exemplo, uma falta trifásica simulada no lado de alta tensão do transformador.

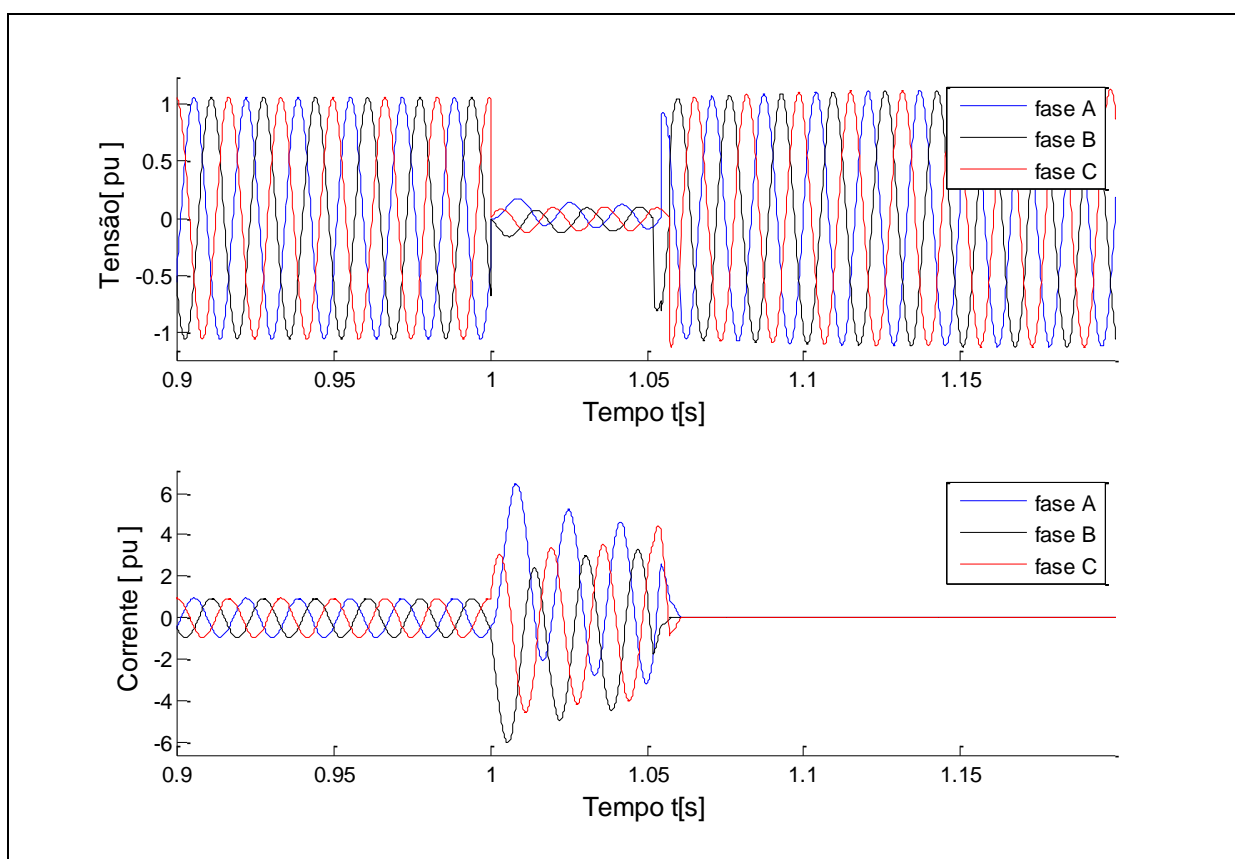


Figura 36: Falta trifásica simulada com carregamento nominal.
Fonte: Autoria própria.

Os dados dos registros simulados foram então submetidos ao processo de segmentação e o resultado obtido com cada *wavelet* mãe da família Daubechies é mostrado no Quadro 3. Para facilitar à interpretação dos dados as *wavelets* mães foram identificadas por cores de acordo com a qualidade do resultado da segmentação. A identificação em verde indica um resultado adequado, com diferença na identificação dos instantes de transitórios menor ou próximo de um ciclo

de frequência fundamental (16,67 ms). A identificação **amarela** indica **atenção** necessária para a diferença de segmentação, mas ainda assim ocorreu a segmentação. Já nas *wavelets* sinalizadas em **vermelho** houve **falha** na detecção de pelo menos um dos instantes, inicial ou final e, portanto, a segmentação não pode ser utilizada para a extração de características.

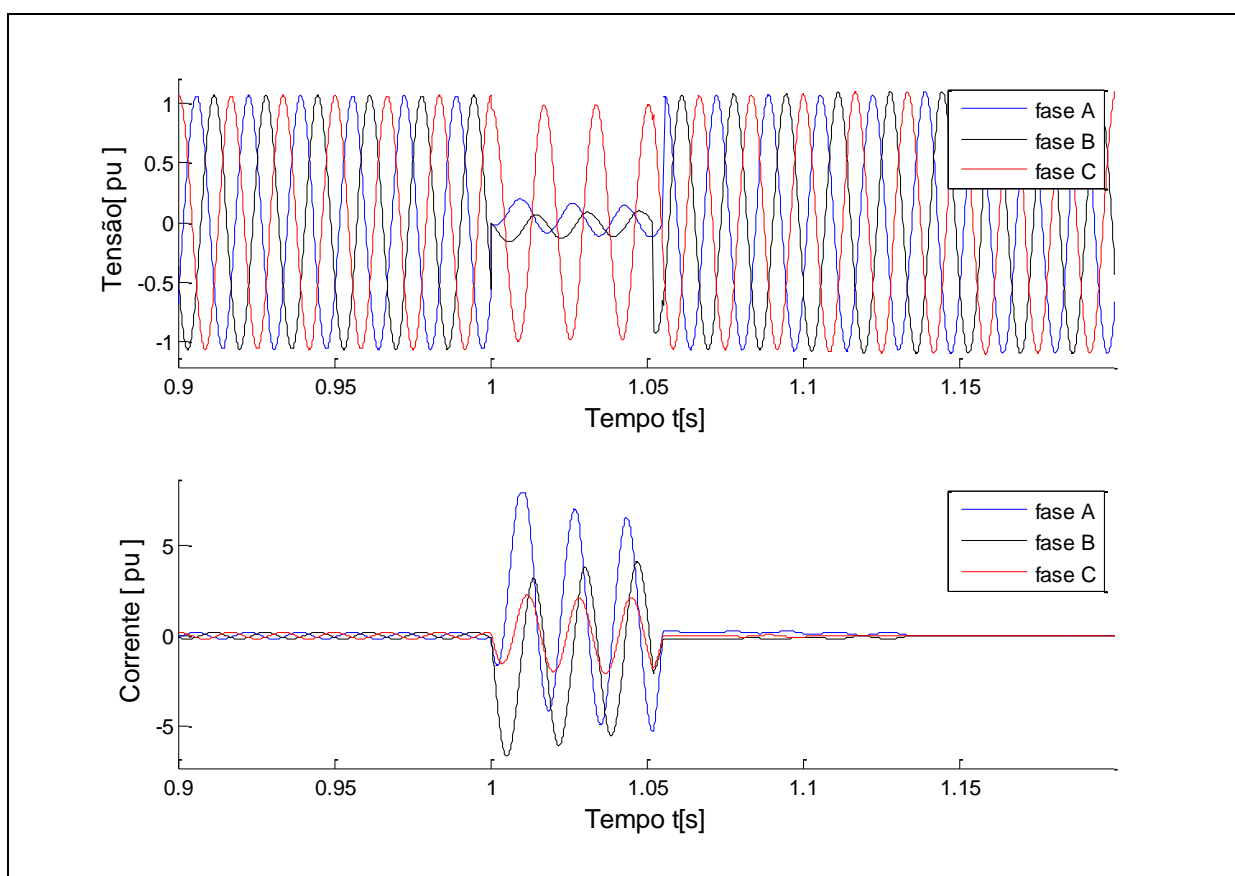
Falta	Local	Wavelet mãe	Instante inicial detectado	Δ inicial	Instante final detectado	Δ final
Monofásica	Saída do gerador	db3	1,0554 s	55,4 ms	1,0595 s	9,5 ms
		db4	1,0165 s	16,5 ms	1,0665 s	16,5 ms
		db5	1,0582 s	58,2 ms	1,0623 s	12,3 ms
		db6	1,0582 s	58,2 ms	1,0637 s	13,7 ms
	Lado de alta do transformador	db3	1,0540 s	54,0 ms	1,0651 s	15,1 ms
		db4	1,0554 s	55,4 ms	1,0651 s	15,1 ms
		db5	1,0554 s	55,4 ms	1,0665 s	16,5 ms
		db6	1,0547 s	54,7 ms	1,0637 s	13,7 ms
Bifásica	Saída do gerador	db3	1,0012 s	1,2 ms	1,0595 s	9,5 ms
		db4	1,0026 s	2,6 ms	1,0609 s	10,9 ms
		db5	1,0026 s	2,6 ms	1,0623 s	12,3 ms
		db6	1,0054 s	5,4 ms	1,0637 s	13,7 ms
	Lado de alta do transformador	db3	1,0012 s	1,2 ms	5,1623 s	4,112 s
		db4	1,0026 s	2,6 ms	1,0582 s	8,2 ms
		db5	1,0026 s	2,6 ms	1,0665 s	16,5 ms
		db6	1,0054 s	5,4 ms	5,2554 s	4,204 s
Trifásica	Saída do gerador	db3	1,0012 s	1,2 ms	1,0609 s	10,9 ms
		db4	1,0026 s	2,6 ms	1,0623 s	12,3 ms
		db5	1,0012 s	1,2 ms	1,0602 s	10,2 ms
		db6	1,0054 s	5,4 ms	1,0651 s	15,1 ms
	Lado de alta do transformador	db3	1,0012 s	1,2 ms	1,0651 s	15,1 ms
		db4	1,0026 s	2,6 ms	1,0609 s	10,9 ms
		db5	1,0026 s	2,6 ms	5,2054 s	4,144 s
		db6	1,0054 s	5,4 ms	1,0679 s	17,9 ms

Quadro 3: Comparação segmentação com carga nominal.

Analisando o Quadro 3, através da escala de cores, verifica-se que as *wavelets* Daubechies db3, db5 e db6 foram sinalizadas em falha uma vez cada. A db3 e a db5 em atenção duas vezes e a db6 três vezes. A db4 apenas uma vez em atenção e nenhuma em falha. Pode-se, portanto, considerar a db4 como a melhor nos testes de segmentação de falta com gerador a plena carga.

5.4 CARREGAMENTO REDUZIDO

Para investigar a influência do carregamento pré falta no método de segmentação foram repetidas as simulações de falta do item acima, porém com carregamento reduzido. A Figura 37 mostra o registro de uma falta bifásica simulada quando o gerador estava operando a 20% da sua capacidade.



**Figura 37: Falta bifásica simulada com carregamento de 0,2 p.u..
Fonte: Autoria própria.**

Foram simuladas faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas, na saída do gerador e no lado de alta tensão do transformador elevador.

Os dados dos registros simulados foram então submetidos ao processo de segmentação e o resultado obtido com cada *wavelet* mãe da família Daubechies é mostrado no Quadro 4. Para facilitar à interpretação dos dados as *wavelets* mães foram identificadas por cores de acordo com a escala definida no item 5.3.

Falta	Local	Wavelet mãe	Instante inicial detectado	Δ inicial	Instante final detectado	Δ final
Monofásica	Saída do gerador	db3	1,0568 s	56,8 ms	4,7623 s	3,71 s
		db4	1,0568 s	56,8 ms	1,0609 s	10,9 ms
		db5	1,0582 s	58,2 ms	1,0637 s	13,7 ms
		db6	1,0595 s	59,5 ms	1,0637 s	13,7 ms
	Lado de alta do transformador	db3	1,0554 s	55,4 ms	1,0582 s	8,2 ms
		db4	1,0554 s	55,4 ms	1,0595 s	9,5 ms
		db5	1,0547 s	54,7 ms	4,9075 s	3,85 s
		db6	1,0582 s	58,2 ms	1,0623 s	12,3 ms
Bifásica	Saída do gerador	db3	1,0012 s	1,2 ms	1,0595 s	9,5 ms
		db4	1,0026 s	2,6 ms	1,0609 s	10,9 ms
		db5	1,0026 s	2,6 ms	5,0012 s	3,95 s
		db6	1,0054 s	5,4 ms	5,0012 s	3,95 s
	Lado de alta do transformador	db3	1,0012 s	1,2 ms	1,0582 s	8,2 ms
		db4	1,0026 s	2,6 ms	1,0595 s	9,5 ms
		db5	1,0026 s	2,6 ms	1,0623 s	12,3 ms
		db6	1,0054 s	5,4 ms	1,0623 s	12,3 ms
Trifásica	Saída do gerador	db3	1,0012 s	1,2 ms	1,0623 s	12,3 ms
		db4	1,0026 s	2,6 ms	1,0637 s	13,7 ms
		db5	1,0012 s	1,2 ms	1,0609 s	10,9 ms
		db6	1,0054 s	5,4 ms	1,0665 s	16,5 ms
	Lado de alta do transformador	db3	1,0012 s	1,2 ms	1,0609 s	10,9 ms
		db4	1,0026 s	2,6 ms	1,0623 s	12,3 ms
		db5	1,0026 s	2,6 ms	1,0637 s	13,7 ms
		db6	1,0054 s	5,4 ms	1,0651 s	15,1 ms

Quadro 4: Comparação segmentação com carga 20%.

Analisando o Quadro 4 através da escala de cores verifica-se que as *wavelets* Daubechies db3 e db6 foram sinalizadas em falha uma vez cada e a db5 duas vezes. A db3 e a db5 em atenção uma vez e as db4 e db6 duas vezes. A db4 foi a única não sinalizada em falha nenhuma vez, podendo ser considerada a melhor nos testes de segmentação de falha com gerador operando a 20% da sua capacidade. Comparando com os testes a plena carga verifica-se que o carregamento tem pouca influência sobre o método de tal forma que esse continua válido mesmo em condições de pouca carga.

5.5 RESISTÊNCIA DE FALTA

Para verificar a influência da resistência de falha na segmentação foram simuladas faltas com diferentes valores de resistência. As simulações foram de faltas trifásicas na saída do gerador com resistência de $0,01\Omega$, $0,1\Omega$ e $0,5\Omega$ e com o gerador operando a plena carga.

Os dados dos registros simulados foram então submetidos ao processo de segmentação e o resultado obtido com cada *wavelet* mãe da família Daubechies é mostrado no Quadro 5. Para facilitar à interpretação dos dados as *wavelets* mães foram identificadas por cores de acordo com a escala definida no item 5.3.

Falta	Local	Wavelet mãe	Instante inicial detectado	Δ inicial	Instante final detectado	Δ final
	$R_{falta} = 0,01 \Omega$	db3	1,0012 s	1,2 ms	1,0609 s	10,9 ms
		db4	1,0026 s	2,6 ms	1,0623 s	12,3 ms
		db5	1,0012 s	1,2 ms	1,0602 s	10,2 ms
		db6	1,0054 s	5,4 ms	1,0651 s	15,1 ms
	$R_{falta} = 0,1 \Omega$	db3	1,0012 s	1,2 ms	1,0595 s	9,5 ms
		db4	1,0026 s	1,2 ms	1,0068 s	43,2 ms
		db5	1,0012 s	1,2 ms	4,5193 s	3,46 s
		db6	1,0054 s	5,4 ms	1,0095 s	40,5 ms
	$R_{falta} = 0,5 \Omega$	db3	1,0005 s	0,5 ms	1,0026 s	47,4 ms
		db4	1,0026 s	2,6 ms	1,0068 s	43,2 ms
		db5	1,0012 s	1,2 ms	1,0033 s	46,7 ms
		db6	1,0054 s	5,4 ms	1,0095 s	40,5 ms

Quadro 5: Comparação segmentação com diferentes resistências de falta.

Analisando o Quadro 5 através da escala de cores verifica-se que a *wavelet* Daubechies db5 foi a única sinalizada em falha. A db3 duas vezes como adequada e as db4 e db6 duas vezes em atenção. De acordo com os resultados apenas a db5 falhou e não deve ser empregada na segmentação de faltas caracterizadas por resistência de falta.

Observando as diferenças entre o momento da falta e o detectado verifica-se que independente da resistência de falta todos os testes conseguiram detectar o instante inicial da falta, porém com o aumento da resistência a detecção do instante final se tornou menos precisa. Isto pode ser explicado devido a natural redução da amplitude da corrente de curto quanto maior for a resistência de falta.

5.6 DEFINIÇÃO DA WAVELET MÃE

No total foram realizadas quinze simulações de diferentes faltas. Cada uma foi testada na segmentação quatro vezes, uma com cada *wavelet* mãe, db3, db4, db5 e db6.

Observando os resultados dos testes anteriores, de acordo com o critério de qualidade definido, é possível comparar os resultados obtidos, conforme mostra o Quadro 6.

<i>Wavelet mãe</i>	Adequada	Atenção	Falha
db3	9	4	2
db4	10	5	0
db5	7	4	4
db6	6	7	2

Quadro 6: Resultado da segmentação.

Através do Quadro 6 pode-se concluir que o melhor resultado geral dos testes de segmentação realizados foi obtido quando usado a *wavelet* mãe Daubechies de quarta ordem (db4). Nos quinze testes a db4 não falhou (classificação em vermelho) em nenhum. Ainda com essa o resultado foi adequado (classificações em verde) em 66,67% dos testes.

Com base na conclusão acima se definiu pelo uso da *Wavelet* Daubechies de quarta ordem no método de segmentação proposto neste trabalho.

6. RESULTADOS

Neste capítulo estão relacionados os resultados obtidos nos testes de aplicação do método de análise proposto. Primeiramente são mostrados os resultados para alguns estudos de casos específicos de ocorrências reais. Foram realizados cinco estudos de caso com registros de ocorrências reais em unidades geradoras. Na sequência é feita análise qualitativa dos resultados obtidos para os testes, incluindo casos que continham diversos registros de oscilografias de ocorrências com causas similares. Os tópicos seguintes descrevem sucintamente a origem dos registros, mostram uma visualização dos mesmos e os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta.

6.1 CASO 1: DESLIGAMENTO FORÇADO POR CURTO-CIRCUITO

Este caso faz parte da base de oscilografias disponibilizadas para estudo por uma concessionária de geração de energia do SIN, e foi escolhido por representar o desligamento forçado de uma unidade geradora devido a um curto-circuito.

As características do sistema são descritas no Quadro 7 e o ponto de ocorrência da falta foi o para-raios da fase B no lado de alta tensão do transformador elevador da unidade. A unidade geradora opera em 50 Hz e é conectada ao SIN através de um conversor para 60 Hz composto por um motor síncrono acoplado a um gerador com diferença de número de polos.

Usina termoeletrica movida a carvão
Unidade geradora 2
Potência ativa: 12MW
Potência reativa: 5,4 Mvar
Tensão de operação: 6 kV
Frequência de operação: 50 Hz
Gerador conectado em triângulo
Transformador elevador 6kV para 69kV
Lado de alta do transformador conectado em estrela

Quadro 7: Características da unidade geradora.

Fonte: Relatório da ocorrência disponibilizado para estudos.

O relatório disponibilizado pela concessionária descreve a ocorrência da seguinte forma:

Desligamento automático da unidade 2 da UT... provocado pela atuação da proteção diferencial da unidade. Os registros oscilográficos e a sequência de eventos indicam a ocorrência de um curto-circuito na fase B do lado de alta do transformador da unidade 2, caracterizado por uma sobrecorrente de 2696A na fase citada anteriormente. Verificou-se uma subtensão nos terminais das unidades associada à sobrecorrente de cerca de 8000A no instante da falta. Os valores pré falta das correntes das unidades eram de aproximadamente 1200A. Após a eliminação da falta com a abertura do disjuntor da unidade 2, as demais unidades continuaram a operar normalmente.

...houve a explosão do para-raio localizado no lado de alta do transformador da unidade 2, o que provocou o curto-circuito para terra na fase B.

A Figura 38 mostra o registro de oscilografia de curta duração das tensões e correntes da unidade geradora 2, envolvida na falta. Os valores apresentados estão normalizados em pu para facilitar as análises.

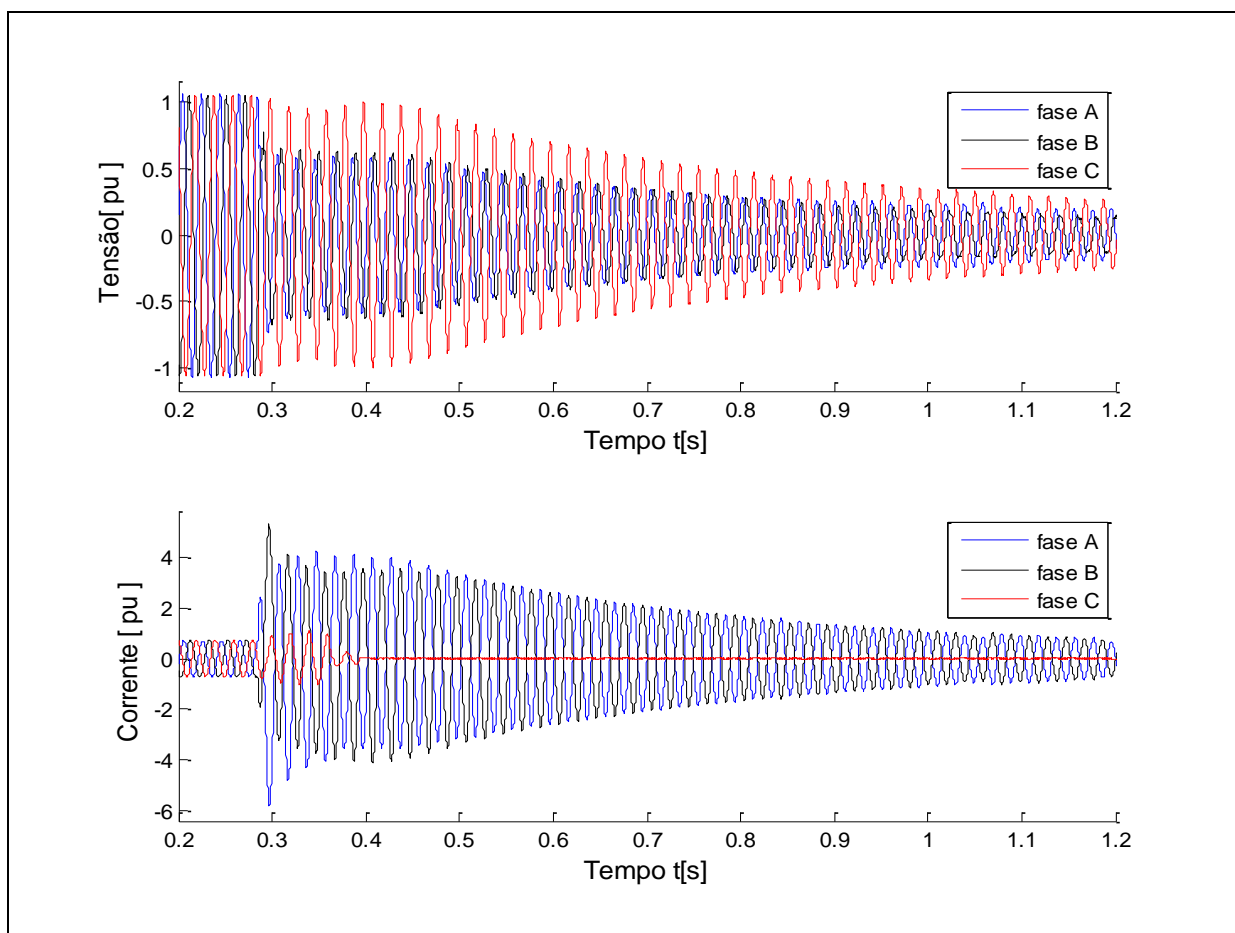


Figura 38: Visualização das tensões e correntes da unidade geradora, caso 1.
Fonte: Dados disponibilizados para estudo por concessionária de geração.

Os sinais de corrente e tensão das três fases foram submetidos a transformada de Clarke-Concórdia e o módulo dos sinais ortogonais alfa-beta

submetidos à análise com a DWT, com a *wavelet* mãe Daubechies de quarta ordem. Os coeficientes de detalhe até o terceiro nível de decomposição foram utilizados. A Figura 39 mostra o resultado da detecção dos transitórios com base na energia do coeficiente de detalhe e no *universal threshold*, calculados de acordo com o método proposto.

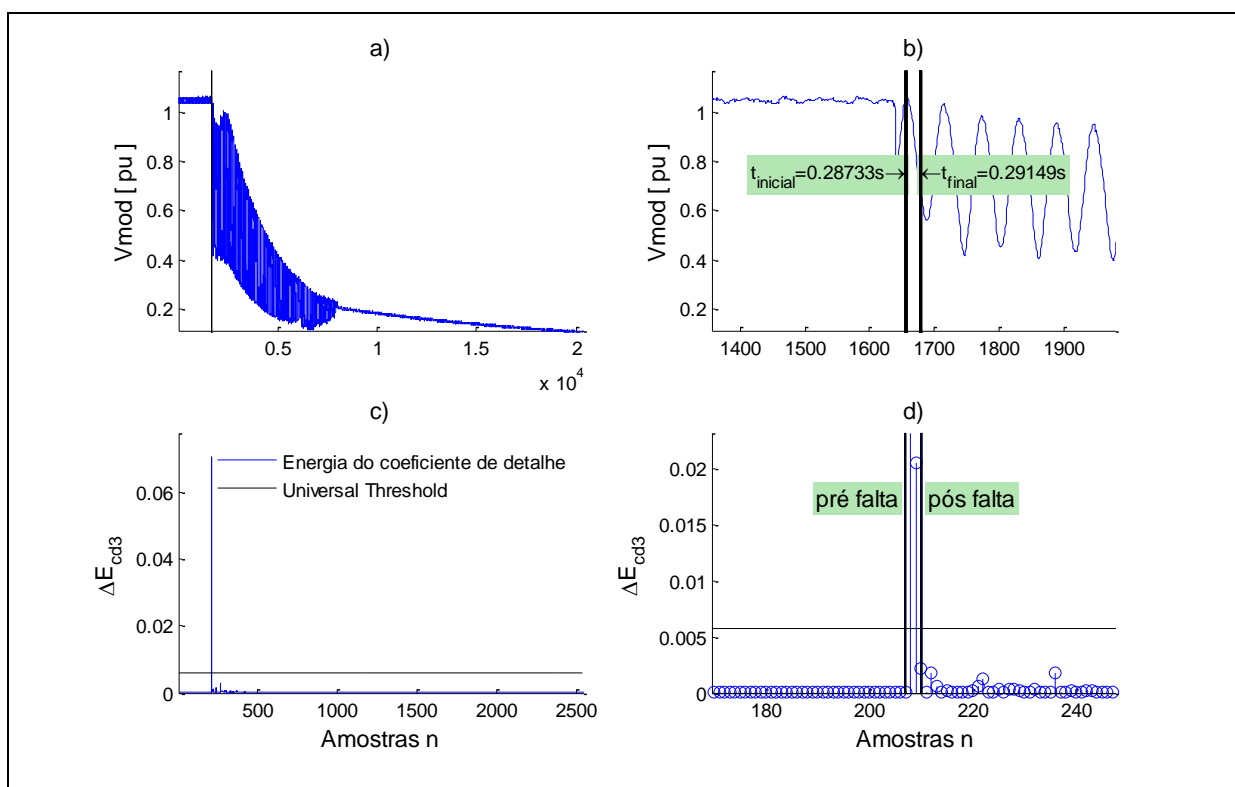


Figura 39: Detalhe da segmentação da tensão, caso 1.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 39 a) mostra o sinal do módulo das tensões ortogonais alfa e beta com destaque para o momento da ocorrência de transitório que é visto em detalhe na Figura 39 b). Para este caso percebe-se que a falta possui curta duração, aproximadamente $\frac{1}{4}$ de ciclo da frequência fundamental 50 Hz ($t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}} = 4,16 \text{ ms} \approx 5 \text{ ms}$). O pico de energia do coeficiente de detalhe 3 aparece na Figura 39 c) juntamente com o *universal threshold*, limiar estabelecido como limite de detecção de transitórios. O detalhe da violação deste limite aparece na Figura 39 d) que também identifica os segmentos pré e pós falta.

A Figura 40 mostra os detalhes da segmentação da corrente, com a mesma disposição de informações da Figura 39. O processo de segmentação pela corrente detectou uma maior duração da falta, bem como mais de um transitório ao longo da falta. Isto se explica por tratar-se de um registro de curto-circuito onde o

o sinal de corrente sofre variações características de arco elétrico. Observa-se na Figura 40 d) que a variação de energia do coeficiente de detalhe $cd3$ sofre oscilações durante o período da falta. Para casos com transitórios consecutivos foi considerada a duração mínima de uma falta como 200ms. Ou seja, se o ΔE_{cd3} variar abaixo e acima do *universal threshold* em um intervalo menor que 200ms este é considerado como parte da mesma falta. Para este caso dois segmentos de falta foram detectados como pode ser visto na Figura 40 b) nos trechos entre as barras verticais.

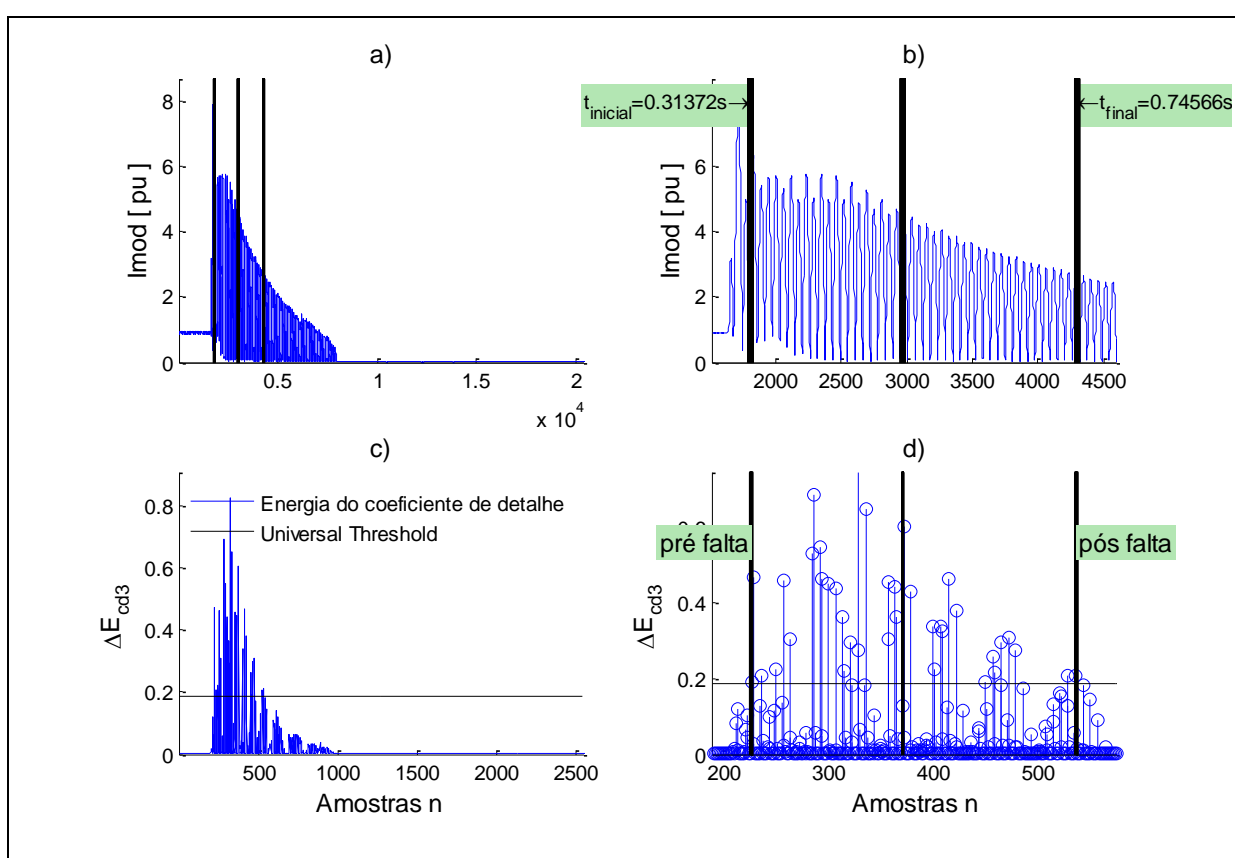


Figura 40: Detalhe da segmentação da corrente, caso 1.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 41 mostra os sinais de tensão e corrente das três fases do gerador, por segmentos. As barras verticais identificam a separação dos segmentos dos sinais. Para a tensão são detectados os segmentos pré falta, falta e pós falta. Já para a corrente dois segmentos de falta são detectados.

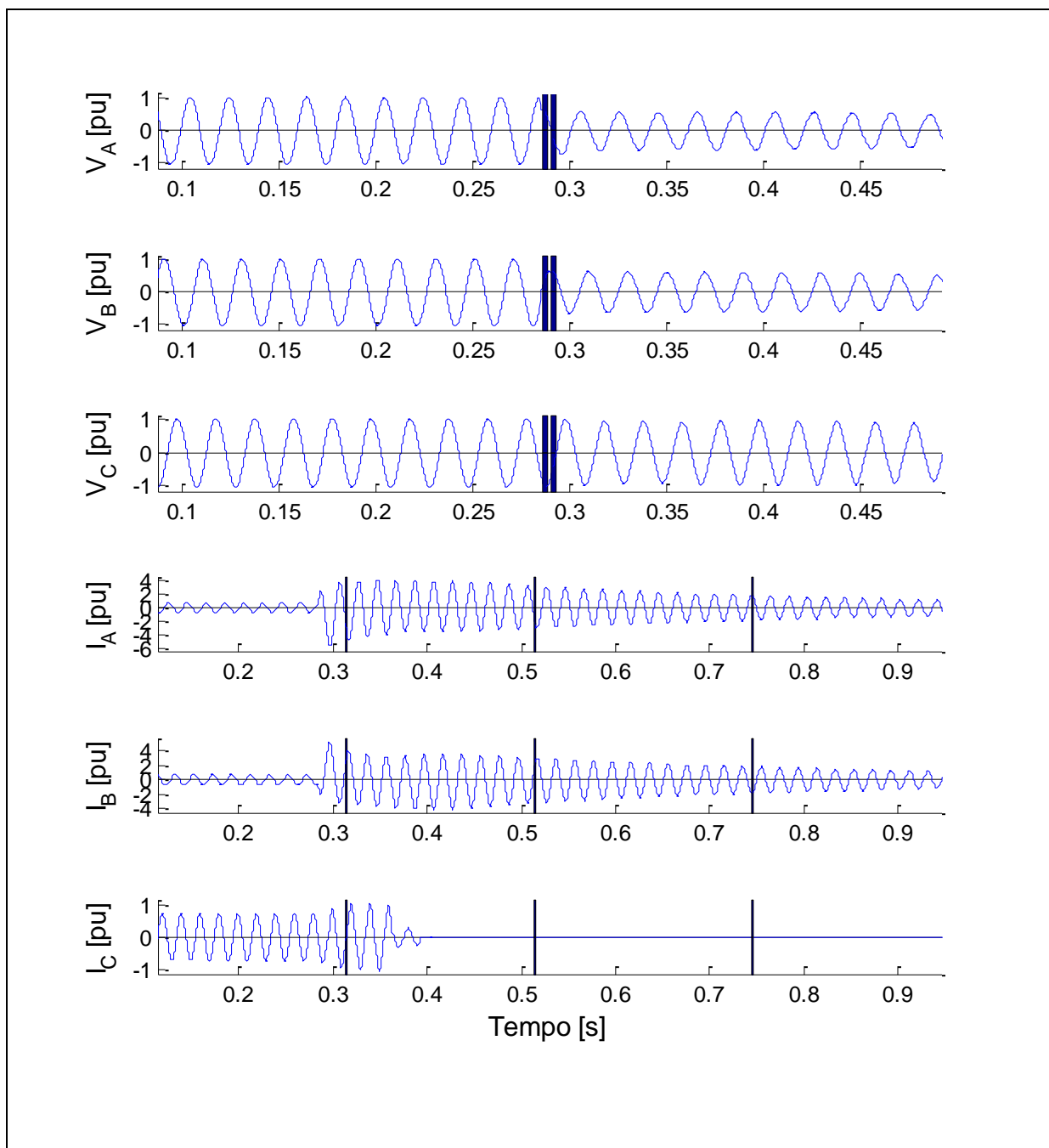


Figura 41: Sinais segmentados, caso 1.
Fonte: Autoria própria.

Conforme pode ser visualizado na Figura 41 a segmentação pela tensão obteve um melhor resultado do que a segmentação pela corrente. Desta forma foi realizada a extração de características com base na segmentação dos sinais de tensão. O Quadro 8 mostra as características extraídas dos sinais, para cada segmento, de acordo com a metodologia proposta.

Características [p.u.]	Segmentos		
	Pré falta	Falta	Pós falta
V_{A_rms}	1,0499	0,4989	0,2447
V_{B_rms}	1,0433	0,8896	0,2413
V_{C_rms}	1,0398	1,2496	0,3464
I_{A_rms}	0,7700	2,3679	1,3035
I_{B_rms}	0,7710	1,7599	1,2568
I_{C_rms}	0,7384	1,0226	0,1402
V_0	0,0024	0,0010	0,0012
V_+	1,0443	0,7996	0,2714
V_-	0,0067	0,4773	0,0755
I_0	0,0167	0,0337	0,0137
I_+	0,9291	1,9160	0,9827
I_-	0,0464	1,0957	0,8264

Quadro 8: Características extraídas em p.u.: caso 1.

A Figura 42 mostra o comportamento dos sinais, com base nas características extraídas, ao longo dos segmentos. É possível visualizar o aumento nas correntes das fases A e B durante a falta enquanto as tensões das mesmas fases sofrem um afundamento. As correntes de sequência, positiva e negativa, também tem um aumento e não é percebida variação na corrente de sequência zero. O comportamento é coerente, pois as medições são do lado de baixa do transformador elevador, ligado em triângulo, e a falta ocorreu na fase B do lado de alta ligado em estrela aterrada.

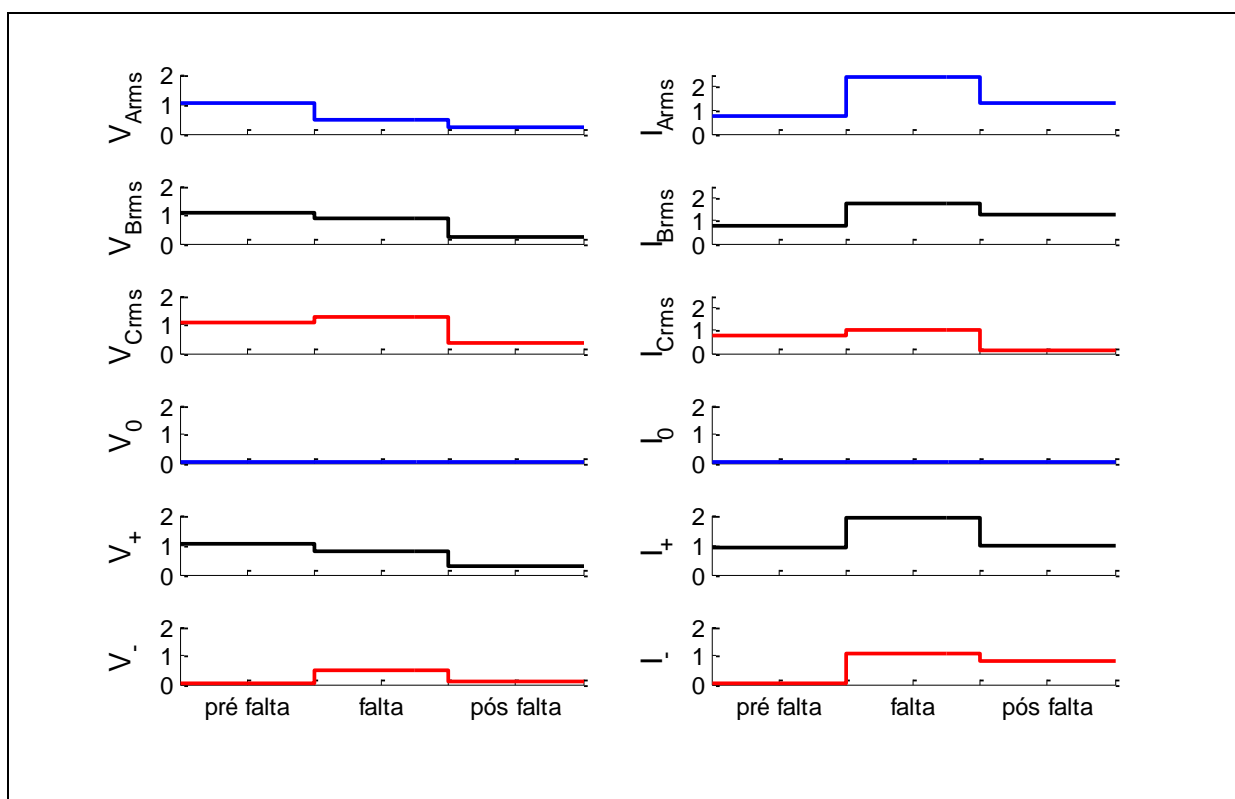


Figura 42: Análise das características extraídas em p.u.: caso 1.

Fonte: Autoria própria.

Para confirmar a eficiência do método proposto, uma etapa de classificação foi realizada de forma manual, a partir do conjunto de dados extraídos. A análise foi realizada com base nas premissas de classificação, propostas por Moreto (2011), onde um conjunto de regras é usado para classificar cada segmento em condições “normais”, “falta equilibrada” e “falta desequilibrada” entre outras. Algumas regras também fazem a correlação entre a classificação dos segmentos consecutivos, obtendo um resultado mais detalhado.

Os dados do Quadro 8 correspondem com a seguinte classificação:

- Segmento pré falta:
 - $(V^- < 0,1\text{pu}) \text{ E } (I^- < 0,07\text{pu}) \text{ E } (I^+ < 1,1\text{pu}) = \text{“operação normal”}$
 - $(V^+ > 0,9\text{pu}) \text{ E } (I^+ > 0,05\text{pu}) \text{ E } (\text{“operação normal”}) = \text{“normal com carga”}$
- Segmento falta:
 - $(V^- > 0,1\text{pu}) \text{ OU } (I^- > 0,07\text{pu}) = \text{“falta desequilibrada”}$
 - $(V_0 < 0,05\text{pu}) \text{ E } (|(V^+) - (V^-)| > 0,2\text{pu}) \text{ E } (\text{“desequilibrada”}) = \text{“falta fase-fase no lado de alta”}$
 - $(V_A < 0,9\text{pu}) \text{ E } (V_B < 0,9\text{pu}) = \text{“fases A e B envolvidas”}$
- Correlação segmentos pre falta e falta:
 - “normal com carga” evolui para “desequilibrada” = “falta com gerador sob carga”

Assim a conclusão obtida é a mesma que a indicada no relatório disponibilizado pela concessionária validando o processo de segmentação proposto. A classificação envolvendo duas fases esta coerente, pois as medições do registro são feitas no lado de baixa tensão ligado em triângulo e a falta ocorreu no lado de alta ligado em estrela.

O caso 1 trata de uma falta em um para-raios com resistência de falta variável devido a existência de arco elétrico através do ar. Na condição pré falta o gerador operava com tensão e corrente próximos dos valores nominais (1 p.u.). A segmentação através da tensão se mostrou mais eficiente, do que através da corrente, detectando um único segmento de falta de curta duração. A segmentação através da corrente detectou dois segmentos de falta, sendo prejudicada pela ocorrência de arco elétrico, que provoca oscilações na energia dos coeficientes de detalhe *wavelet*.

6.2 CASO 2: DESLIGAMENTO DO GERADOR POR PERDA DE EXCITAÇÃO

Para testar a aplicação da análise *wavelet* em registros de desligamentos não ocasionados por curto-circuito utilizou-se um registro de desligamento causado por perda de excitação em uma unidade geradora. Este registro também foi disponibilizado para estudo por uma concessionária de geração de energia do SIN.

A Figura 43 mostra o registro de oscilografia de curta duração das correntes e tensões da unidade geradora.

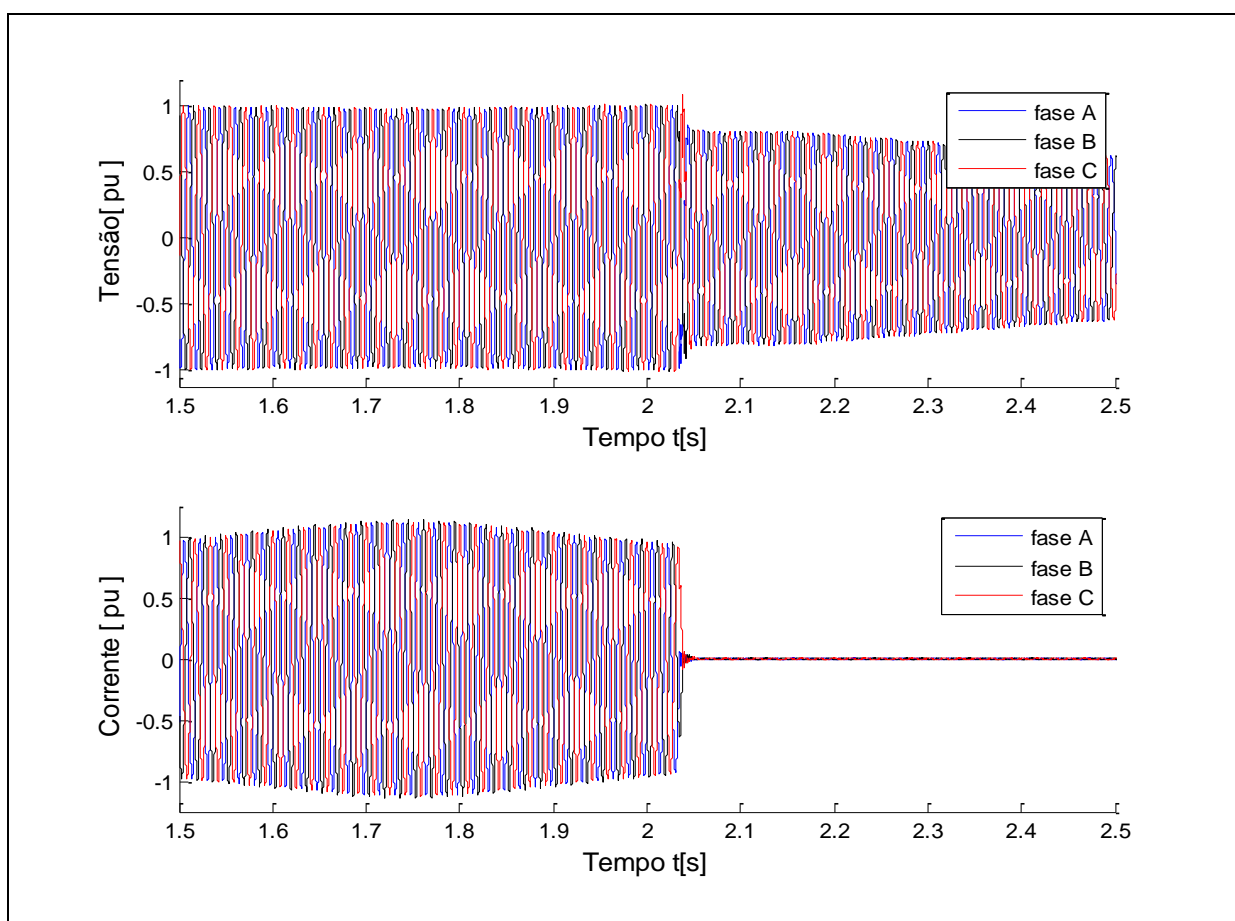


Figura 43: Visualização das correntes e tensões da unidade geradora, caso 2.

Fonte: Dados disponibilizados para estudo por concessionária de geração.

Os sinais de corrente e tensão das três fases foram convertidos para as coordenadas alfa e beta pela transformada de Clarke-Concórdia e o módulo destes sinais ortogonais submetidos à análise com a DWT, utilizando a *wavelet* mãe db4. A energia dos coeficientes de detalhe, até o terceiro nível de decomposição, foi calculada e utilizada na detecção dos transitórios. A Figura 44 mostra o resultado da

detecção dos transitórios com base na variação de energia do coeficiente de detalhe e no *universal threshold*.

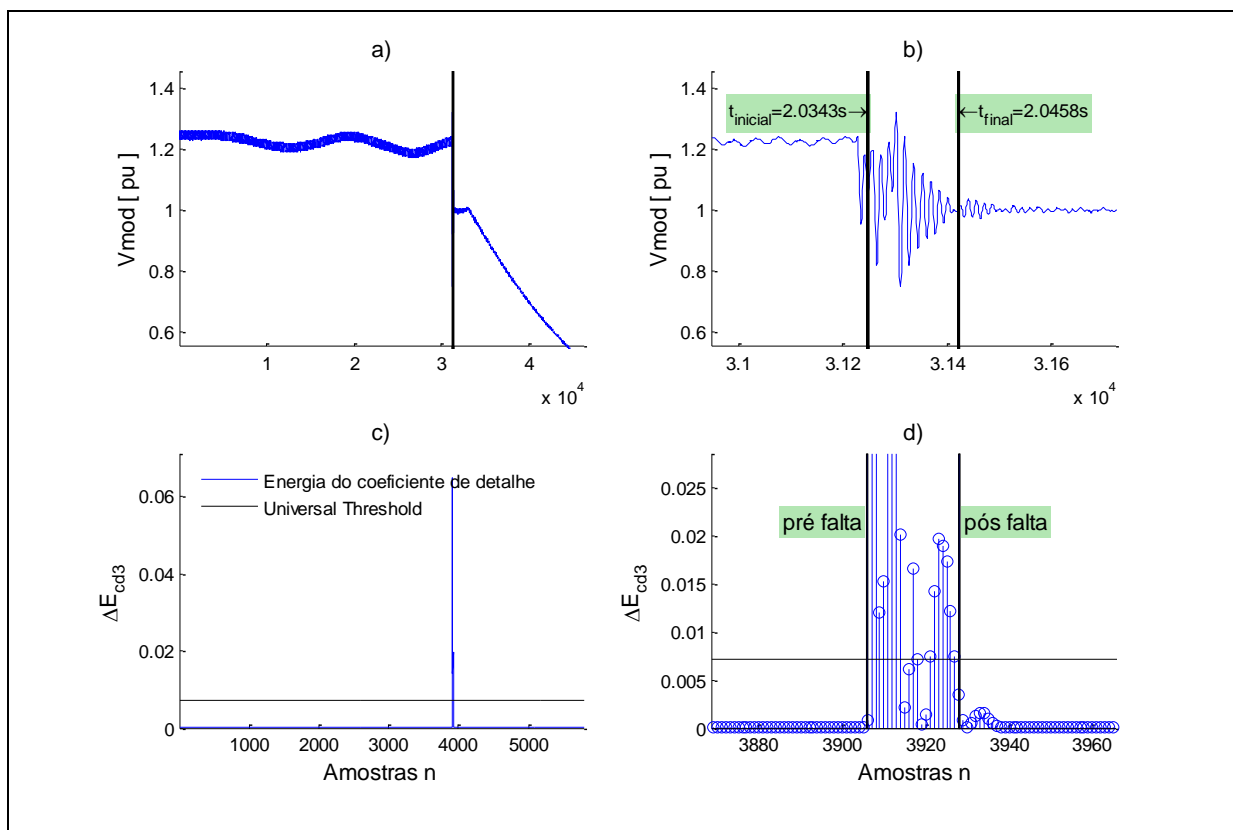


Figura 44: Detalhe da segmentação da tensão, caso 2.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 44 a) mostra o sinal do módulo das tensões ortogonais alfa-beta com destaque para o momento da ocorrência de transitório que é visto em detalhe na Figura 44 b). Verifica-se que a falta durou aproximadamente $\frac{3}{4}$ de ciclo da frequência fundamental 60 Hz ($t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}} = 11,5$ ms). O pico da variação de energia do coeficiente de detalhe 3 aparece na Figura 44 c) juntamente com o *universal threshold* calculado. O detalhe da violação deste limite aparece na Figura 44 d) que também identifica os segmentos pré e pós falta.

A Figura 45 mostra os detalhes da segmentação da corrente, com a mesma disposição de informações da Figura 44.

A Figura 46 mostra os sinais de tensão e corrente das três fases do gerador, por segmentos. As barras verticais identificam a separação dos segmentos dos sinais. Tanto para a tensão quanto para corrente são detectados os segmentos pré falta, falta e pós falta.

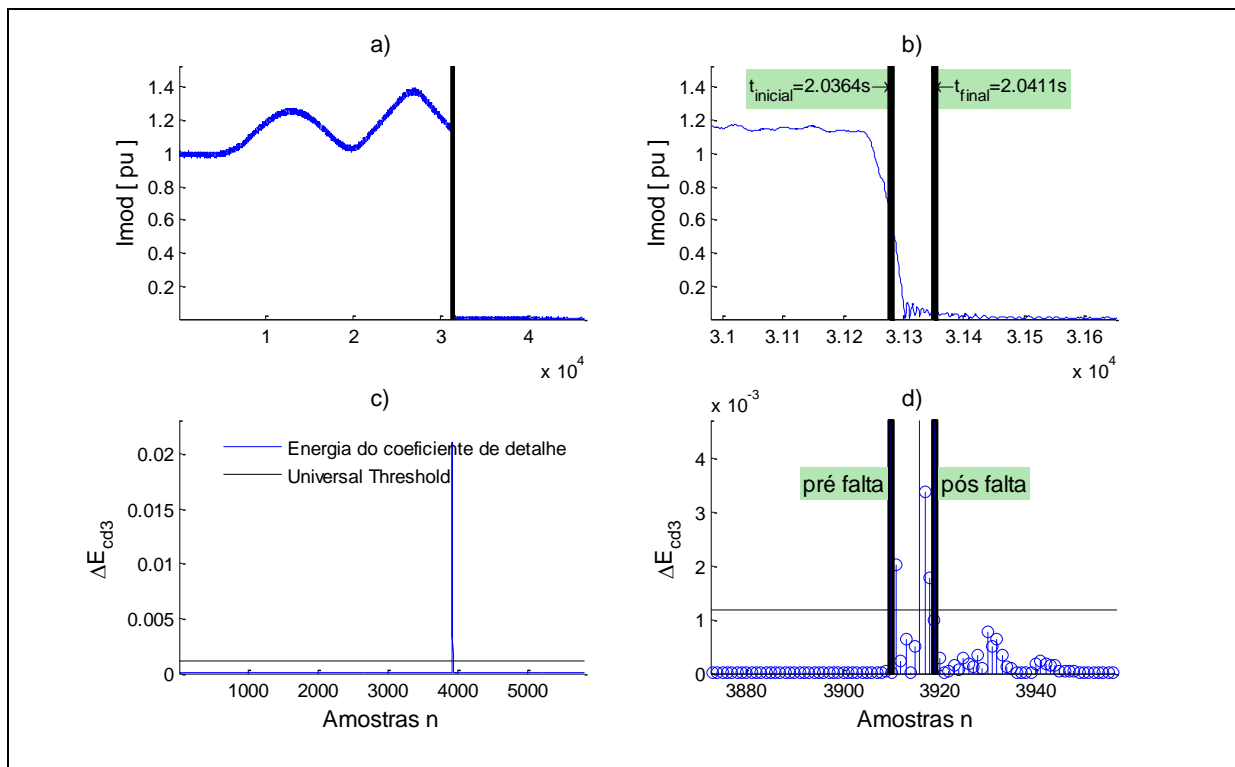


Figura 45: Detalhe da segmentação da corrente, caso 2.
Fonte: Autoria própria.

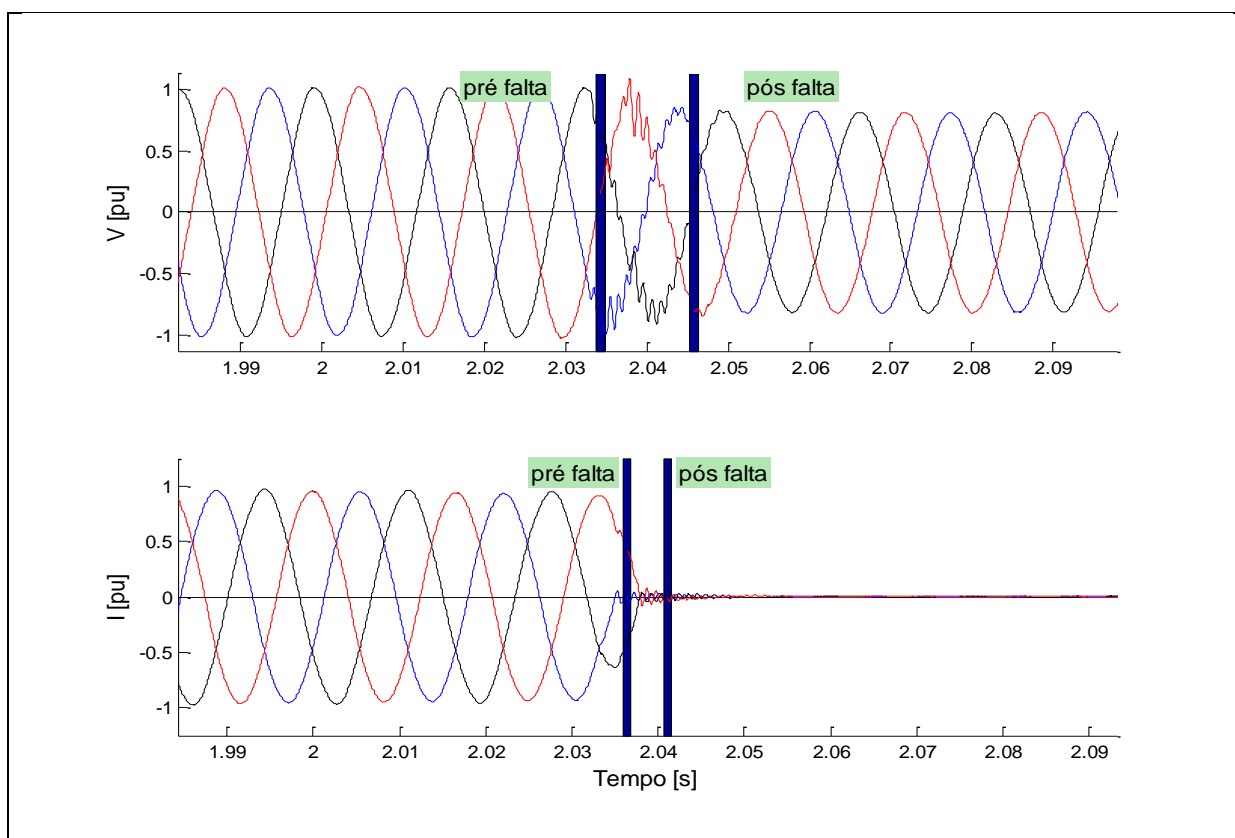


Figura 46: Sinais segmentados, caso 2.
Fonte: Autoria própria.

Para melhor visualizar a segmentação a Figura 47 mostra de forma individual cada sinal segmentado. A análise da Figura 47 permite verificar que tanto a segmentação com base nos sinais de tensão quanto a segmentação com base na corrente mostraram um segmento de falta de curta duração. Isto é explicado pelo fato da perda de excitação provocar uma redução brusca da corrente no gerador.

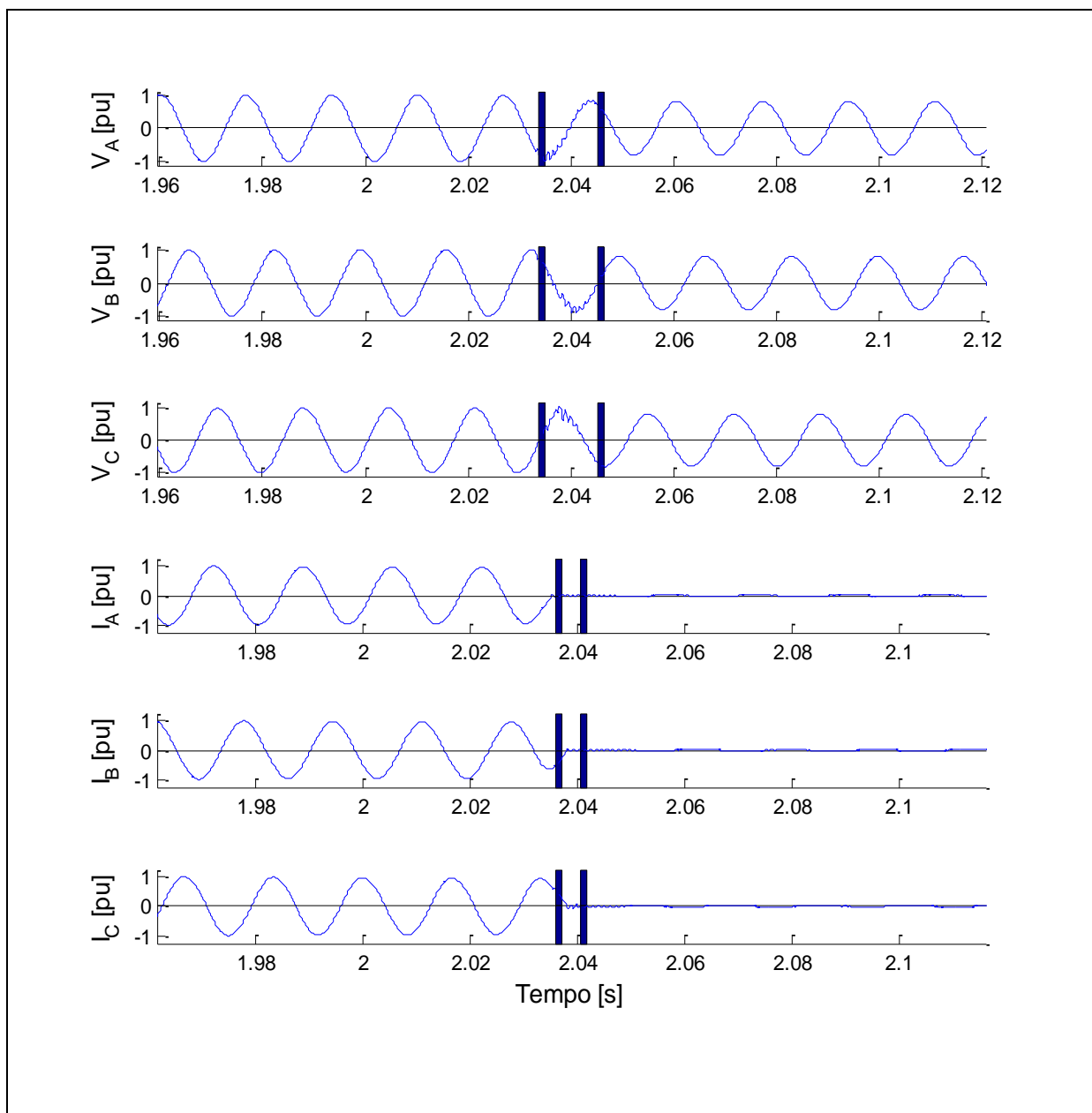


Figura 47: Sinais segmentados individualmente, caso 2.
Fonte: Autoria própria.

As características extraídas com base na segmentação dos sinais de tensão são mostradas no Quadro 9, para cada segmento, de acordo com a metodologia proposta.

Características [p.u.]	Segmentos		
	Pré falta	Falta	Pós falta
V_{A_rms}	0,9967	0,9280	0,6318
V_{B_rms}	0,9960	0,7596	0,6301
V_{C_rms}	0,9999	0,8545	0,6325
I_{A_rms}	0,9386	0,0577	0,0068
I_{B_rms}	0,9425	0,3785	0,0071
I_{C_rms}	0,9414	0,4021	0,0074
V_0	0,0088	0,0084	0,0044
V_+	0,9974	0,8453	0,6314
V_-	0,0029	0,0894	0,0012
I_0	0,0042	0,0008	0,0007
I_+	0,9408	0,2509	0,0070
I_-	0,0083	0,1996	0,0004

Quadro 9: Características extraídas em p.u.: caso 2.

A evolução dos sinais, visualizada na Figura 48, mostra uma queda brusca nas correntes de fase e uma gradativa queda nas tensões de fase. Esse comportamento é coerente com a perda de excitação. Vê-se que não há corrente de sequência zero e a corrente de sequência positiva também sofre uma redução drástica durante o segmento de falta, corroborando para a inexistência de curto-circuito.

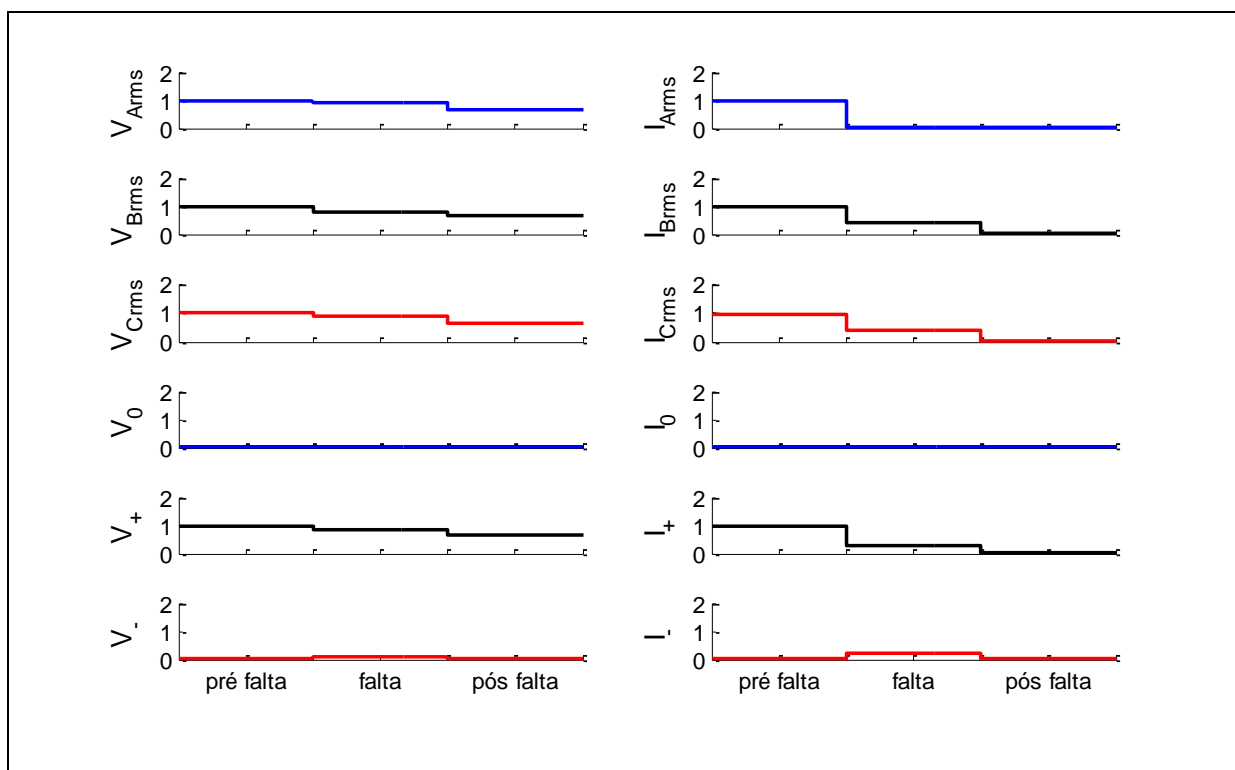


Figura 48: Análise das características extraídas em p.u.: caso 2.

Fonte: Autoria própria.

Para confirmar a eficiência do método proposto, novamente uma etapa de classificação foi realizada de forma manual, com os mesmos critérios do caso anterior.

Os dados do Quadro 9 correspondem com a seguinte classificação:

- Segmento pré falta:
 - $(V^- < 0,1\text{pu}) \text{ E } (I^- < 0,07\text{pu}) \text{ E } (I^+ < 1,1\text{pu}) = \text{“operação normal”}$
 - $(V^+ > 0,9\text{pu}) \text{ E } (I^+ > 0,05\text{pu}) \text{ E } (\text{“operação normal”}) = \text{“normal com carga”}$
- Segmento falta:
 - $(V^- < 0,1\text{pu}) = \text{“falta equilibrada”}$
- Correlação segmentos pre falta e falta:
 - $\text{“normal com carga” evolui para “equilibrada”} = \text{“falta com gerador sob carga”}$
- Segmento pós falta:
 - $(V^- < 0,1\text{pu}) \text{ E } (I^- < 0,07\text{pu}) \text{ E } (I^+ < 1,1\text{pu}) = \text{“operação normal”}$
 - $(0,1\text{pu} < V^+ < 0,9\text{pu}) \text{ E } (I^+ < 0,05\text{pu}) = \text{“desenergização”}$

A classificação obtida condiz com a ocorrência, pois o gerador operava sob carga quando ocorreu falha no sistema de excitação e na sequência a atuação do sistema de proteção desligando a unidade sem registro de correntes de curto-circuito.

No caso 2 o gerador também operava a plena carga, em condições nominais, quando houve a perda da excitação provocando uma imediata eliminação das correntes, e gradativa redução da tensão devido ao magnetismo residual. O resultado da segmentação através da corrente foi similar ao resultado obtido através da tensão. Neste caso observa-se que a perda de excitação provoca uma redução brusca da corrente sem ocasionar variação de energia dos coeficientes de detalhe *wavelets* relacionadas com correntes de curto-circuito.

6.3 CASO 3: DESENERGIZAÇÃO POR REVERSÃO DE POTÊNCIA

Para avaliar a análise *wavelet* em registros com transitórios lentos utilizou-se um registro de desligamento causado por reversão de potência (atuação da função de proteção ANSI 32). Este tipo de registro é caracterizado por um decaimento exponencial lento da tensão, devido ao magnetismo residual da unidade geradora. Também se verifica que neste registro o gerador operava com baixo carregamento na pré falta. Este registro também foi disponibilizado para estudo por uma concessionária de geração de energia do SIN.

A Figura 49 mostra o registro de oscilografia de curta duração das correntes e tensões da unidade geradora.

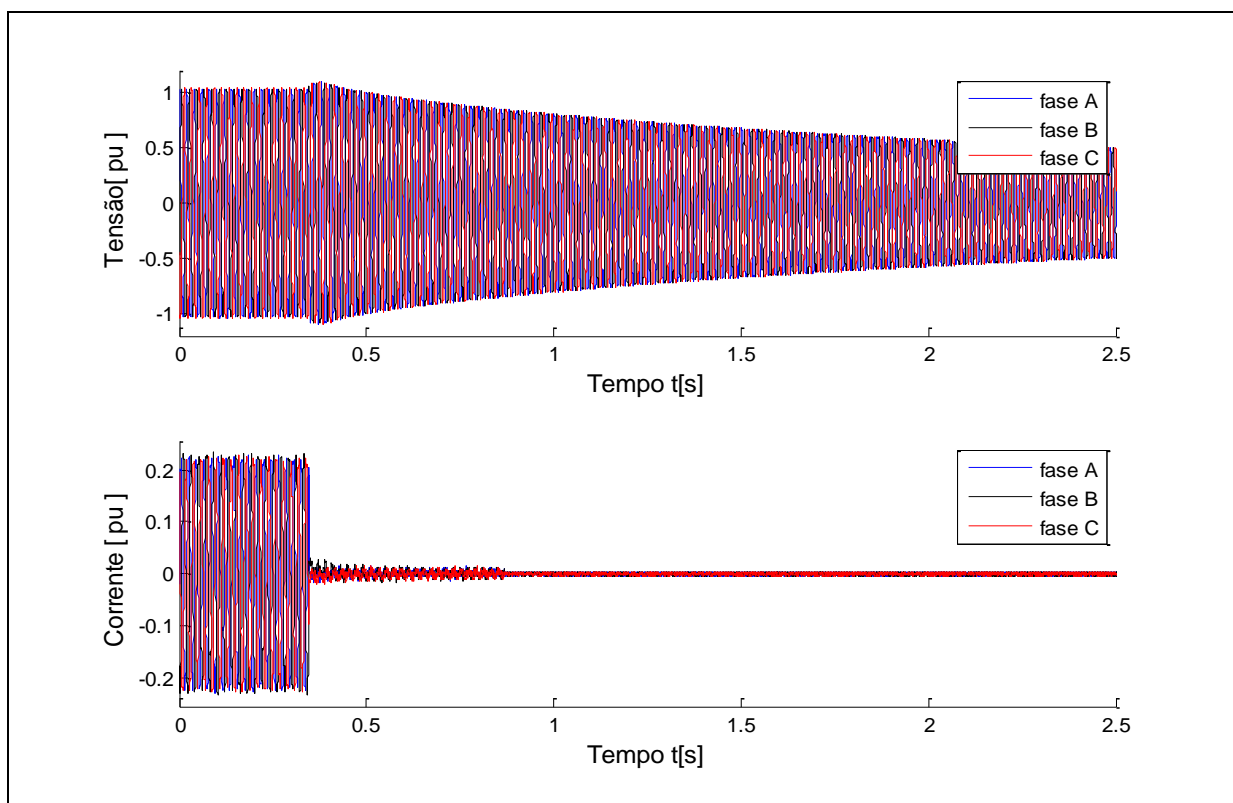


Figura 49: Visualização das correntes e tensões da unidade geradora, caso 3.
Fonte: Dados disponibilizados para estudo por concessionária de geração.

Os sinais de corrente e tensão das três fases foram submetidos à análise com a DWT, com a *wavelet* mãe db4, após a mudança para base alfa-beta da transformada de Clarke-Concórdia. A energia dos coeficientes de detalhe, até o terceiro nível de decomposição, foi calculada e utilizada na detecção dos transitórios. A Figura 50 mostra o resultado da detecção dos transitórios com base

na variação de energia do coeficiente de detalhe e no *universal threshold* para os sinais de tensão.

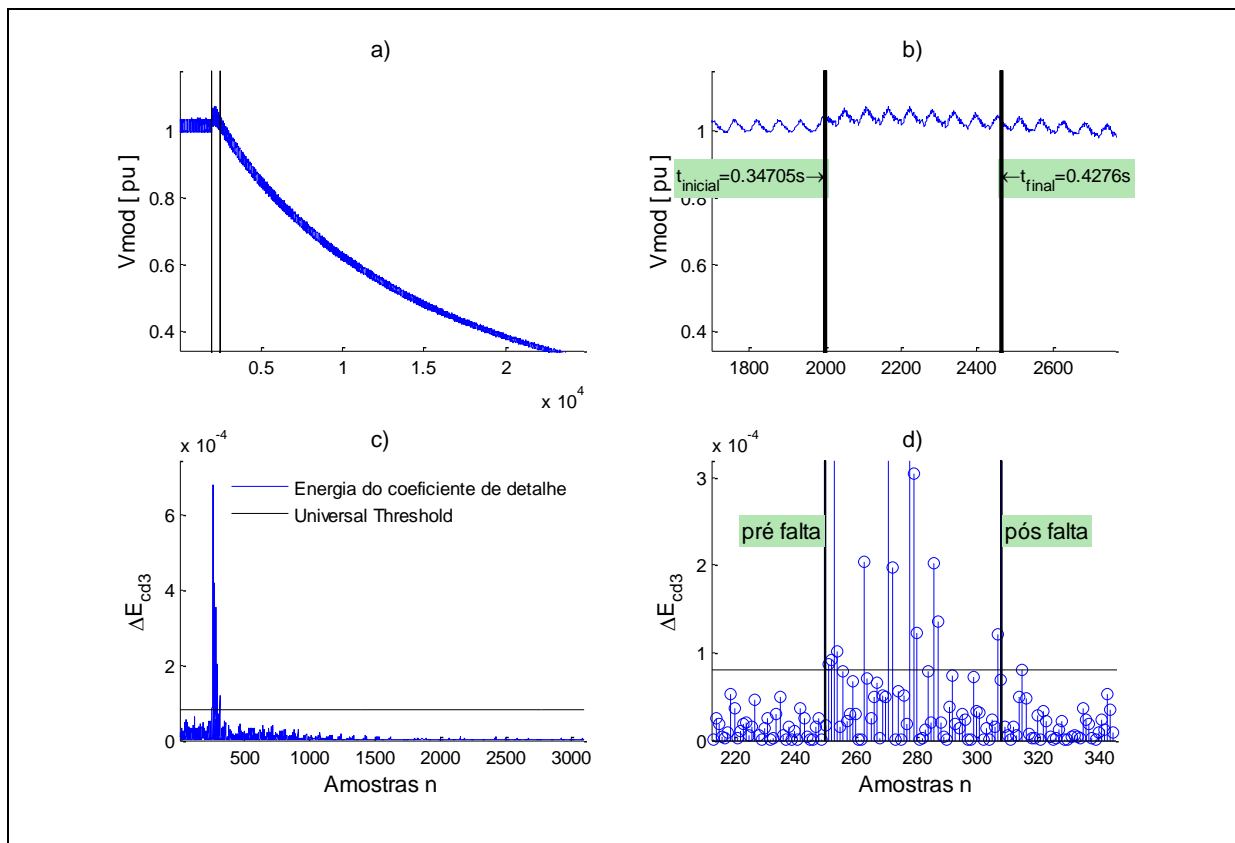


Figura 50: Detalhe da segmentação da tensão para transitório lento, caso 3.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 50 a) mostra o módulo dos sinais alfa-beta com destaque para o momento da ocorrência de transitório que é visto em detalhe na Figura 50 b). Verifica-se que o transitório é lento, com duração de alguns ciclos. O pico da variação de energia do coeficiente de detalhe 3 aparece na Figura 50 c) juntamente com o *universal threshold* calculado. O detalhe da violação deste limite aparece na Figura 50 d) que também identifica os segmentos pré e pós falta.

A Figura 51 mostra os detalhes da segmentação da corrente, com a mesma disposição de informações da Figura 50.

A Figura 52 mostra os sinais de tensão e corrente das três fases do gerador, por segmentos. As barras verticais identificam a separação dos segmentos nos sinais.

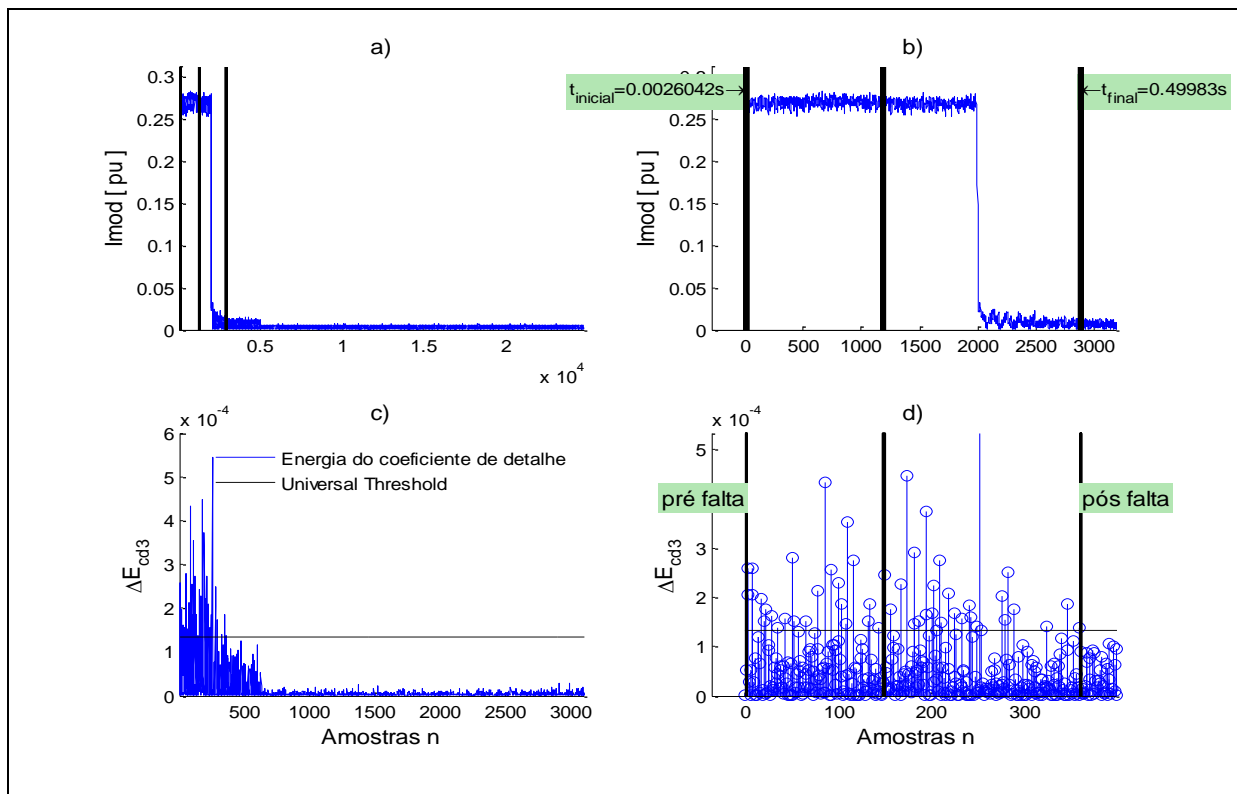


Figura 51: Detalhe da segmentação da corrente para transitório lento, caso 3.
Fonte: Autoria própria.

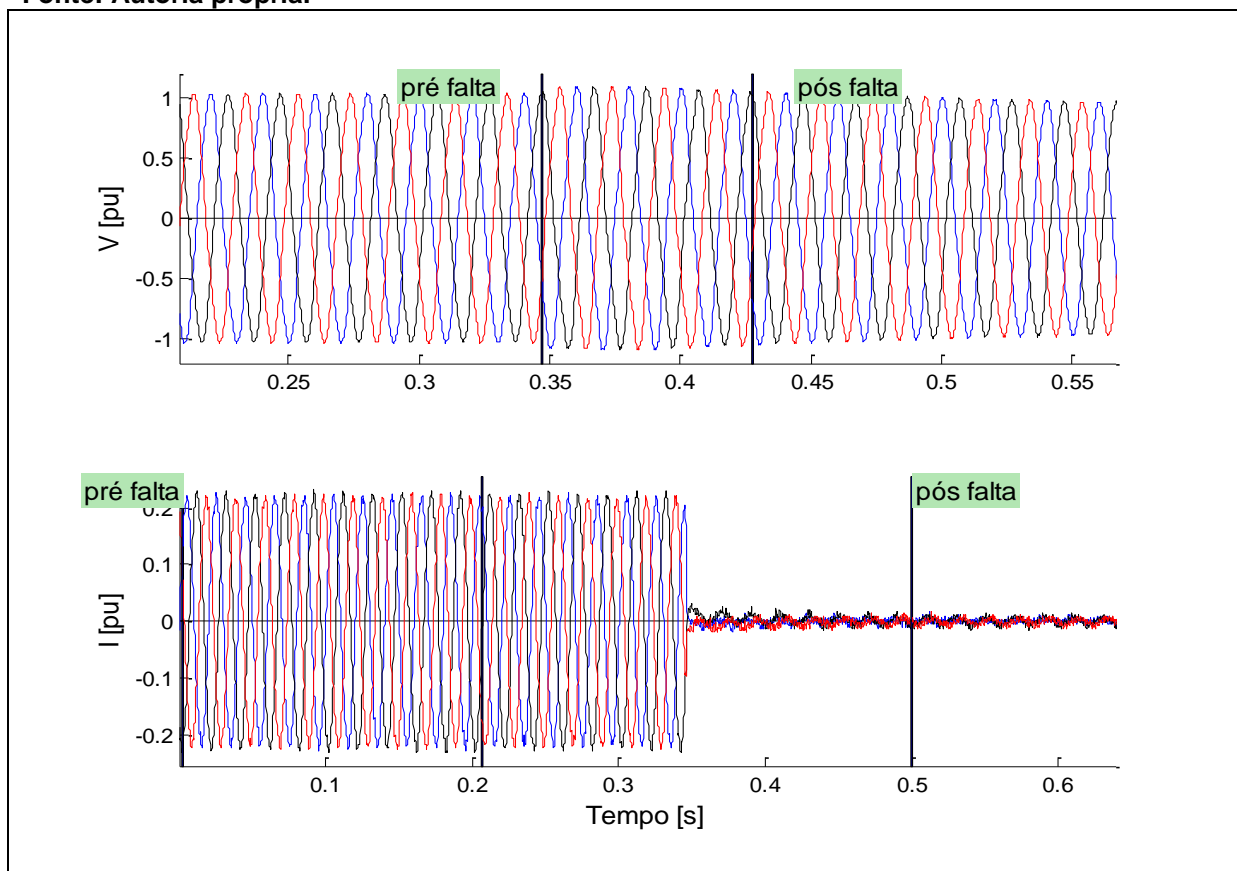


Figura 52: Sinais segmentados para transitório lento, caso 3.
Fonte: Autoria própria.

Para melhor visualizar a segmentação a Figura 53 mostra de forma individual cada sinal segmentado. Verifica-se que mesmo em registros com transitórios lentos é possível utilizar a variação de energia dos coeficientes de detalhe juntamente com o *universal threshold* para identificar o momento da ocorrência. Porém, como se percebe na Figura 53, para este caso específico a segmentação através da corrente resultou em erro na identificação do instante de desligamento. Também se percebe pela Figura 51 a presença de uma oscilação nos sinais de corrente pré falta. É necessário considerar o fato de o gerador estar com pouca carga, o que é característico em desligamento por reversão de potência. Desta forma também se conclui que a segmentação através da corrente não é adequada quando o gerador estiver submetido a baixos valores de correntes de carga.

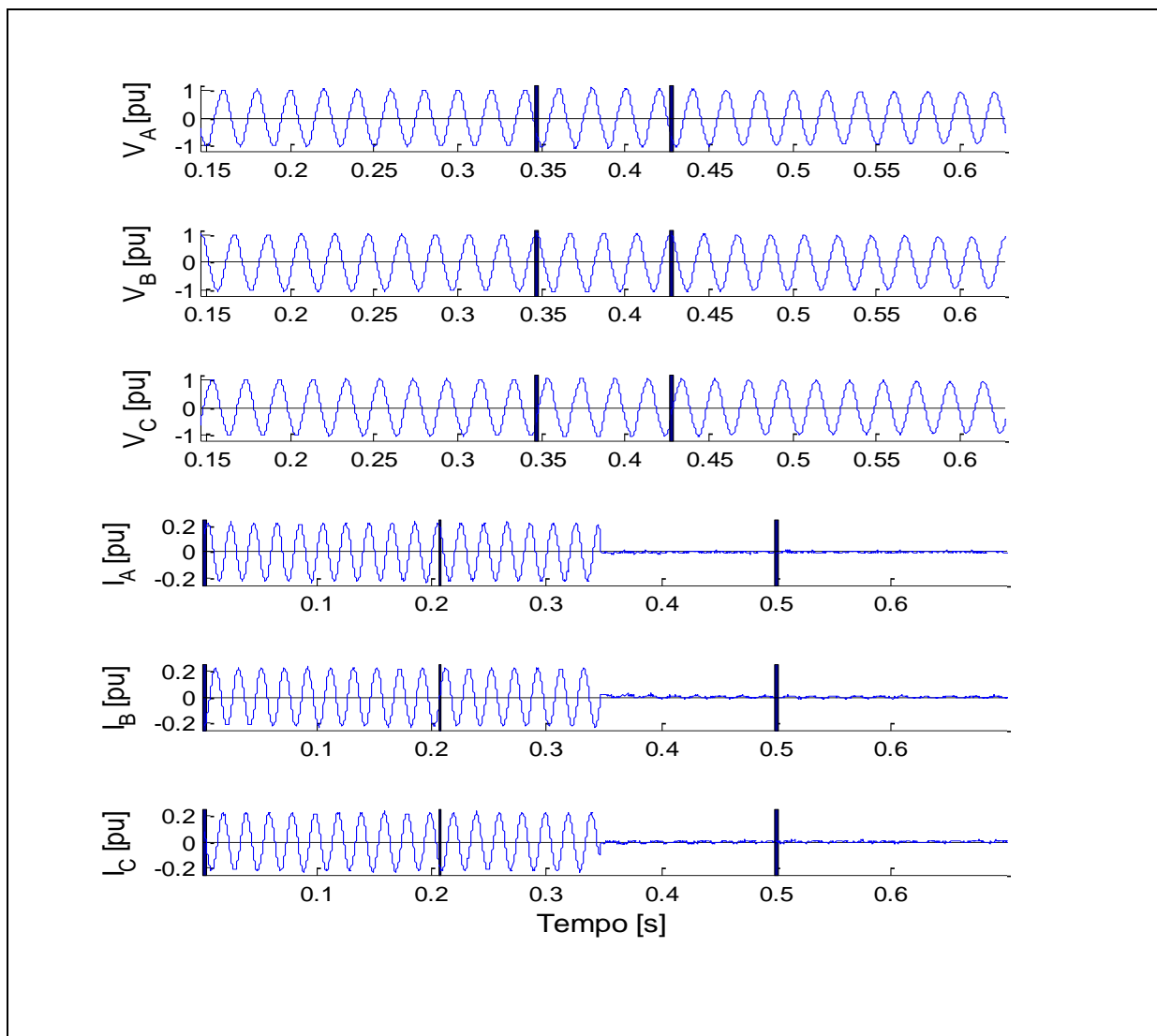


Figura 53: Sinais segmentados individualmente, caso 3.
Fonte: Autoria própria.

As características extraídas com base na segmentação dos sinais de tensão são mostradas no Quadro 10, para cada segmento, de acordo com a metodologia proposta.

Características [p.u.]	Segmentos		
	Pré falta	Falta	Pós falta
$V_{A \text{ rms}}$	1,0129	1,0417	0,5947
$V_{B \text{ rms}}$	1,0070	1,0396	0,5934
$V_{C \text{ rms}}$	1,0145	1,0334	0,5933
$I_{A \text{ rms}}$	0,2164	0,0079	0,0038
$I_{B \text{ rms}}$	0,2240	0,0150	0,0042
$I_{C \text{ rms}}$	0,2166	0,0118	0,0039
V_0	0,0291	0,0471	0,0067
V_+	1,0101	1,0349	0,5936
V_-	0,0160	0,0177	0,0084
I_0	0,0032	0,0040	0,0019
I_+	0,2682	0,0125	0,0035
I_-	0,0035	0,0031	0,0006

Quadro 10: Características extraídas em p.u.: caso 3.

Pela análise das características, mostradas na Figura 54, pode-se concluir pela inexistência de curto-circuito, pois no segmento de falta as correntes, de fase e de sequência, são todas nulas. Também se vê que na pré falta as correntes estavam próximas de zero, mostrando que o carregamento do gerador era mínimo, condição *sine qua non* para a reversão de potência.

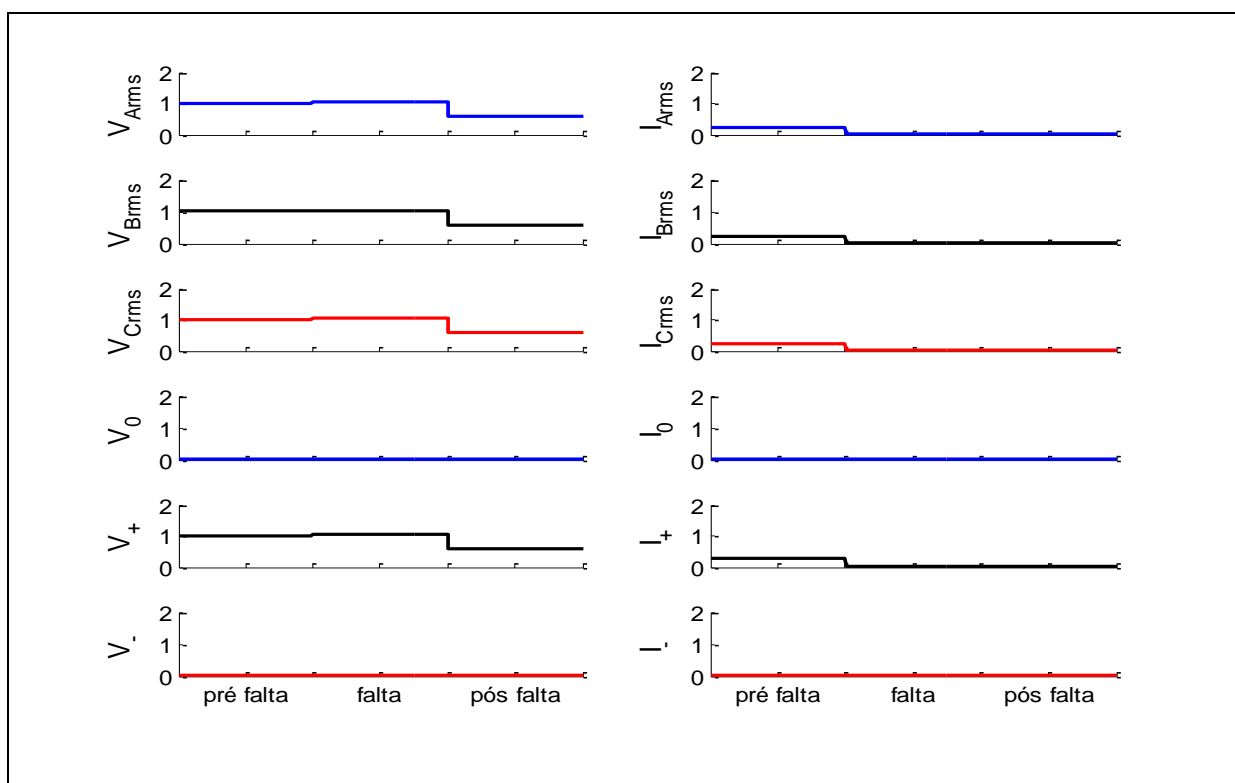


Figura 54: Análise das características extraídas em p.u.: caso 3.

Fonte: Autoria própria.

Para confirmar a eficiência do método proposto, a etapa de classificação foi realizada de forma manual, com os mesmos critérios dos casos anteriores.

Os dados do Quadro 10 correspondem com a seguinte classificação:

- Segmento pré falta:
 $(V^- < 0,1\text{pu}) \text{ E } (I^- < 0,07\text{pu}) \text{ E } (I^+ < 1,1\text{pu}) = \text{“operação normal”}$
 $(V^+ > 0,9\text{pu}) \text{ E } (I^+ > 0,05\text{pu}) \text{ E } (\text{“operação normal”}) = \text{“normal com carga”}$
- Segmento falta:
 $(V^- < 0,1\text{pu}) = \text{“falta equilibrada”}$
- Correlação segmentos pre falta e falta:
 $\text{“normal com carga” evolui para “equilibrada”} = \text{“falta com gerador sob carga”}$
- Segmento pós falta:
 $(V^- < 0,1\text{pu}) \text{ E } (I^- < 0,07\text{pu}) \text{ E } (I^+ < 1,1\text{pu}) = \text{“operação normal”}$
 $(0,1\text{pu} < V^+ < 0,9\text{pu}) \text{ E } (I^+ < 0,05\text{pu}) = \text{“desenergização”}$

Novamente a classificação obtida esta condizente com a ocorrência, pois o gerador operava com 0,2 pu de carga quando ocorreu falha e na sequência ocorre atuação do sistema de proteção e a desenergização da unidade, sem ocorrência de correntes características de curto-circuito.

O caso 3 ilustra uma situação em que o gerador opera quase a vazio, ou seja, com tensão próxima da nominal e corrente quase nula e sofre uma motorização. O transitório de tensão é lento e o transitório de corrente é de baixa amplitude, pois as correntes pré falta são baixas. O resultado da segmentação através da tensão foi satisfatório, pois identificou corretamente o instante do desligamento. Já o resultado obtido na segmentação pela corrente resultou em erro na identificação do instante de desligamento. Pela análise da Figura 51 percebe-se a existência de oscilação no sinal de corrente que pode ser causada pela própria vibração do conjunto turbina-gerador no processo de motorização. Essa oscilação se torna representativa no coeficiente de detalhe *wavelet* devido a inexistência de correntes de curto-circuito que provocassem grande variação na energia dos coeficientes. Essa característica pode ser utilizada, para uma classificação mais precisa desse tipo de ocorrência, relacionando com a causa primária do desligamento. Desta forma também se conclui que a segmentação através da corrente não é adequada quando o gerador estiver submetido a baixos valores de correntes de carga.

6.4 CASO 4: DEFEITO EM DISJUNTOR (VÁRIOS TRANSITÓRIOS)

Para avaliar o método proposto em registros com diversos transitórios utilizou-se um registro de desligamento causado por defeito no disjuntor de interligação do gerador com o sistema. Este registro é caracterizado por várias oscilações decorrentes da impossibilidade de isolar o gerador da falta, pois o equipamento responsável pelo desligamento apresentou defeito. Este registro também foi disponibilizado para estudo por uma concessionária de geração de energia do SIN.

A Figura 55 mostra o registro de oscilografia de curta duração das correntes e tensões da unidade geradora, onde se verifica que o gerador operava com carregamento nominal antes da ocorrência da falta.

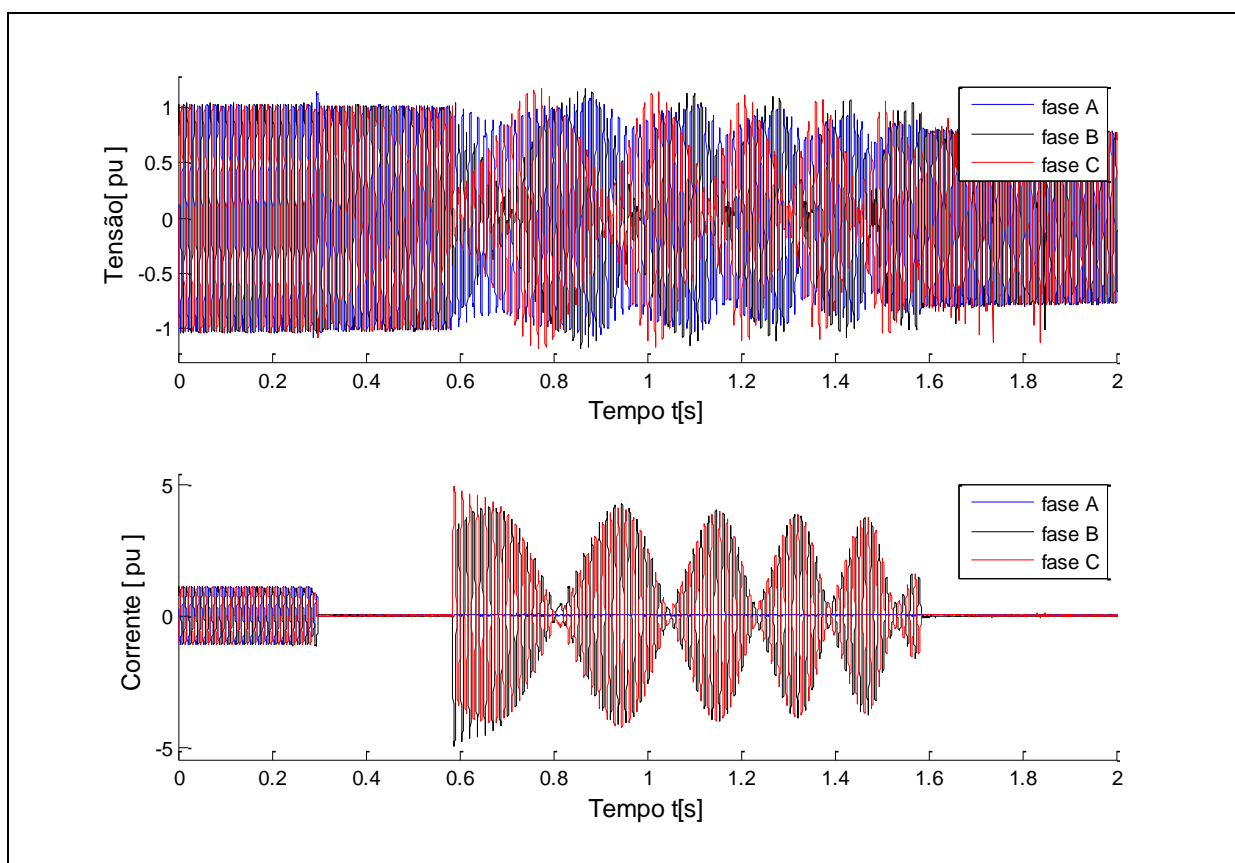


Figura 55: Visualização das correntes e tensões da unidade geradora, caso 4.
Fonte: Dados disponibilizados para estudo por concessionária de geração.

Os sinais de corrente e tensão das três fases foram submetidos à análise com a DWT, com a *wavelet* mãe db4, após a mudança para base alfa-beta da transformada de Clarke-Concórdia. A energia dos coeficientes de detalhe, até o

terceiro nível de decomposição, foi calculada e utilizada na detecção dos transitórios. A Figura 56 mostra o resultado da detecção dos transitórios com base na variação de energia do coeficiente de detalhe e no *universal threshold* para os sinais de tensão.

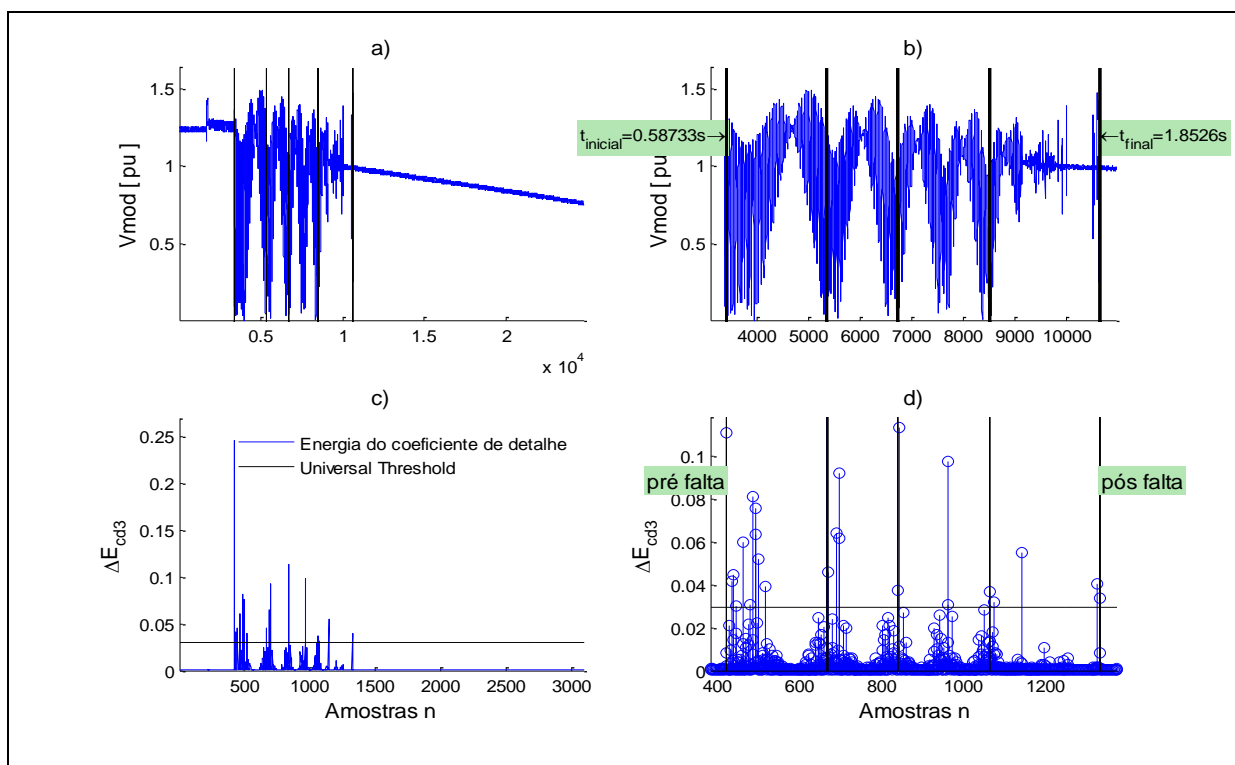


Figura 56: Detalhe da segmentação da tensão, vários transitórios, caso 4.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 56 a) mostra o módulo dos sinais alfa-beta com destaque para o momento da ocorrência de transitório que é visto em detalhe na Figura 56 b). Verifica-se que ocorrem diversas variações bruscas na energia do coeficiente de detalhe, todas com duração de alguns ciclos. Os picos da variação de energia do coeficiente de detalhe 3 ultrapassam o *universal threshold* algumas vezes de maneira consecutiva como mostra Figura 56 c). O detalhe da violação deste limite aparece na Figura 56 d) que também identifica os segmentos.

A Figura 57 mostra os detalhes da segmentação da corrente, com a mesma disposição de informações da Figura 56. Também no processamento através da corrente verifica-se que ocorrem diversas variações bruscas na energia do coeficiente de detalhe. Os picos da variação de energia do coeficiente de detalhe *wavelet* ultrapassam o *universal threshold* algumas vezes de maneira consecutiva, como mostra Figura 57 c). O detalhe da violação deste limite aparece na Figura 57 d) que também identifica os segmentos.

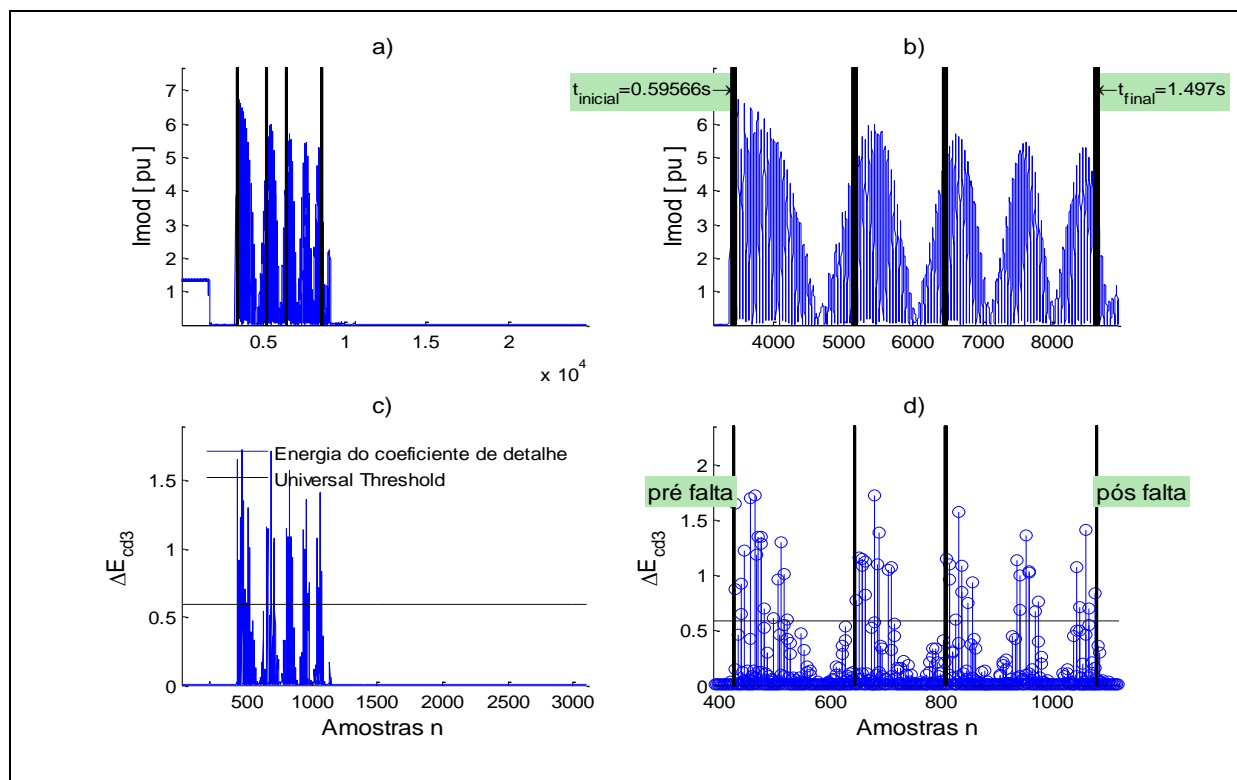


Figura 57: Detalhe da segmentação da corrente, vários transitórios, caso 4.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 58 mostra os sinais de tensão e corrente das três fases do gerador, por segmentos. Cada segmento é separado por barras verticais, sendo os segmentos pré falta e pós falta nomeados.

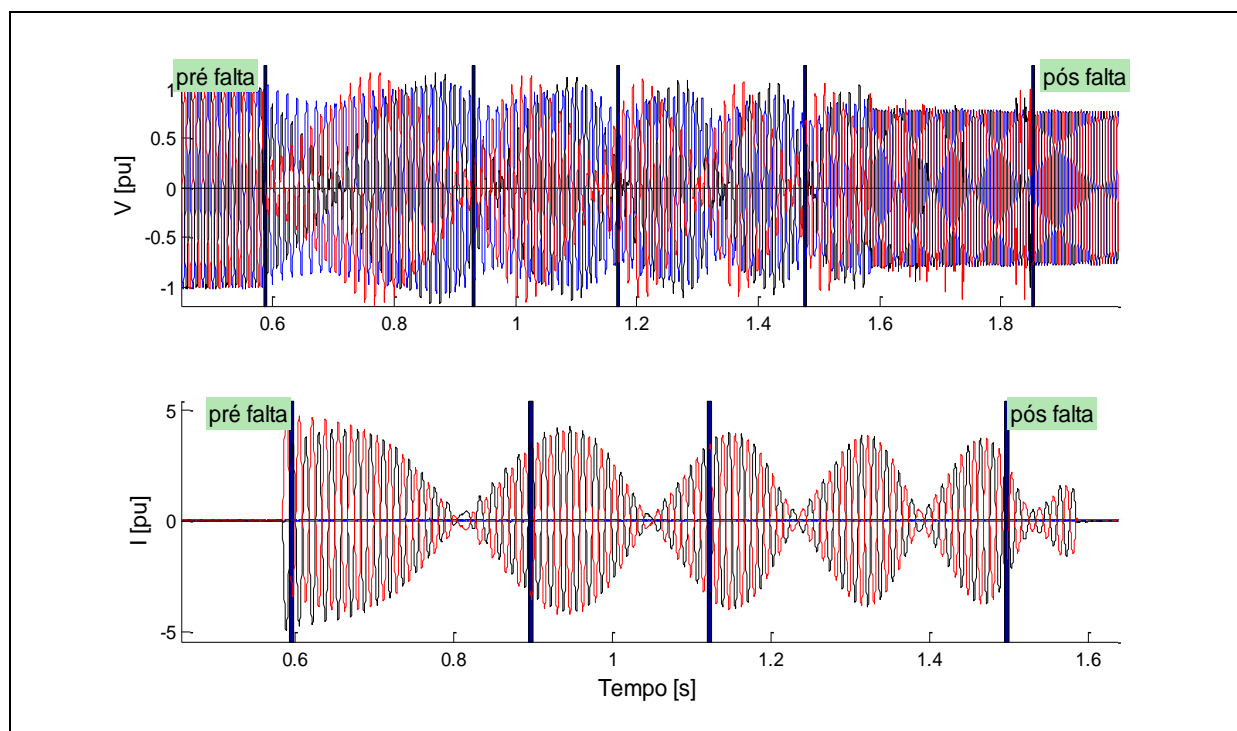


Figura 58: Sinais segmentados para vários transitórios, caso 4.
Fonte: Autoria própria.

Para melhor visualizar a segmentação a Figura 59 mostra de forma individual cada sinal segmentado.

Este estudo de caso mostra a ocorrência de vários transitórios consecutivos, com intervalos maiores que os 200ms adotados como intervalo mínimo. O relatório da ocorrência, fornecido em conjunto com o registro, mostra que houve a explosão da fase B do disjuntor de conexão do gerador com o SIN. Como a falta ocorreu no lado de alta do transformador elevador e o registro é do lado de baixa, duas fases são sensibilizadas pelo defeito. Mesmo após o desligamento completo da subestação, por atuação de proteção de barra o gerador continuou a alimentar a falta. Devido a persistência do defeito são detectados vários transitórios e produzidos quatro segmentos para os sinais de tensão e três para os sinais de corrente, porém tanto a segmentação pela tensão como pela corrente falharam ao não detectar o instante do desligamento inicial.

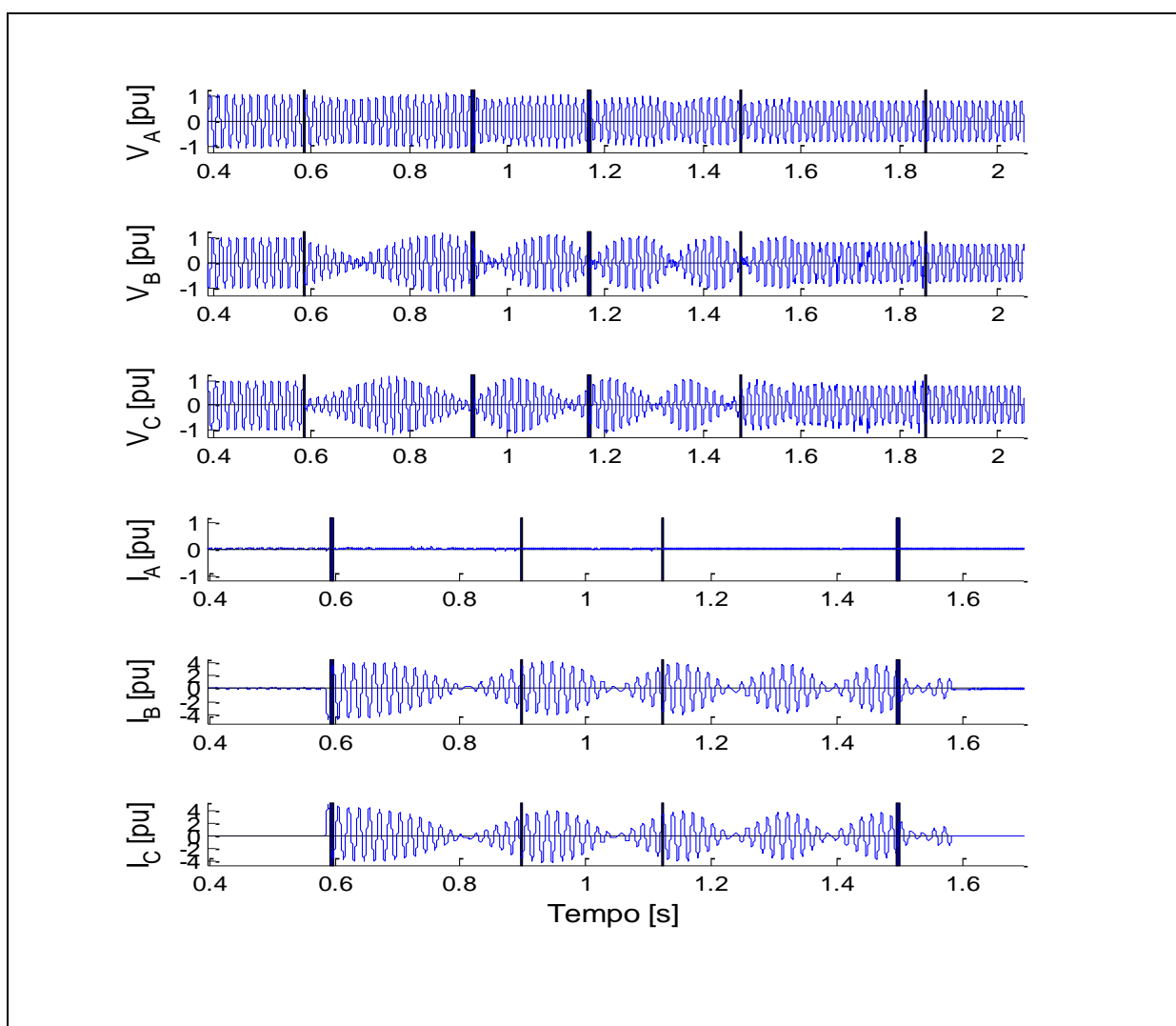


Figura 59: Sinais segmentados individualmente, caso 4.
Fonte: Autoria própria.

As características extraídas com base na segmentação dos sinais de tensão são mostradas no Quadro 11, para cada segmento, de acordo com a metodologia proposta.

Características [p.u.]	Segmentos					
	Pré falta	Falta 1	Falta 2	Falta 3	Falta 4	Pós falta
$V_{A\ rms}$	1,0241	0,9674	0,9230	0,8586	0,8194	0,7188
$V_{B\ rms}$	1,0265	0,7778	0,7633	0,7821	0,8181	0,7203
$V_{C\ rms}$	1,0177	0,7597	0,7484	0,7407	0,8232	0,7173
$I_{A\ rms}$	0,7629	0,0547	0,0510	0,0500	0,0498	0,0502
$I_{B\ rms}$	0,8126	3,2269	2,9803	2,5954	0,9800	0,0031
$I_{C\ rms}$	0,8109	3,2066	2,9615	2,5818	0,9744	0,0374
V_0	0,0185	0,0331	0,0352	0,0339	0,0199	0,0124
V_+	1,0223	0,8253	0,8038	0,7895	0,8195	0,7185
V_-	0,0066	0,1469	0,1230	0,0753	0,0057	0,0026
I_0	0,0208	0,0254	0,0177	0,0198	0,0207	0,0205
I_+	0,9731	2,2912	2,1186	1,8451	0,7043	0,0226
I_-	0,0413	2,2577	2,0829	1,8156	0,6774	0,0138

Quadro 11: Características extraídas em p.u.: caso 4.

Mesmo com a segmentação detectando vários segmentos de falta é possível analisar o comportamento geral da ocorrência através das características extraídas, como mostra a Figura 60. As correntes pré falta evidenciam o carregamento próximo do nominal e no momento da falta duas fases são afetadas com o pico de corrente chegando próximo de 3 pu confirmando a existência de curto-circuito. Não há corrente de sequência zero e as correntes de sequência, positiva e negativa, tem comportamento idêntico, o que aponta para a ocorrência de curto no lado de alta do transformador elevador. Analisando os segmentos de falta como um único segmento é possível realizar a classificação da falta.

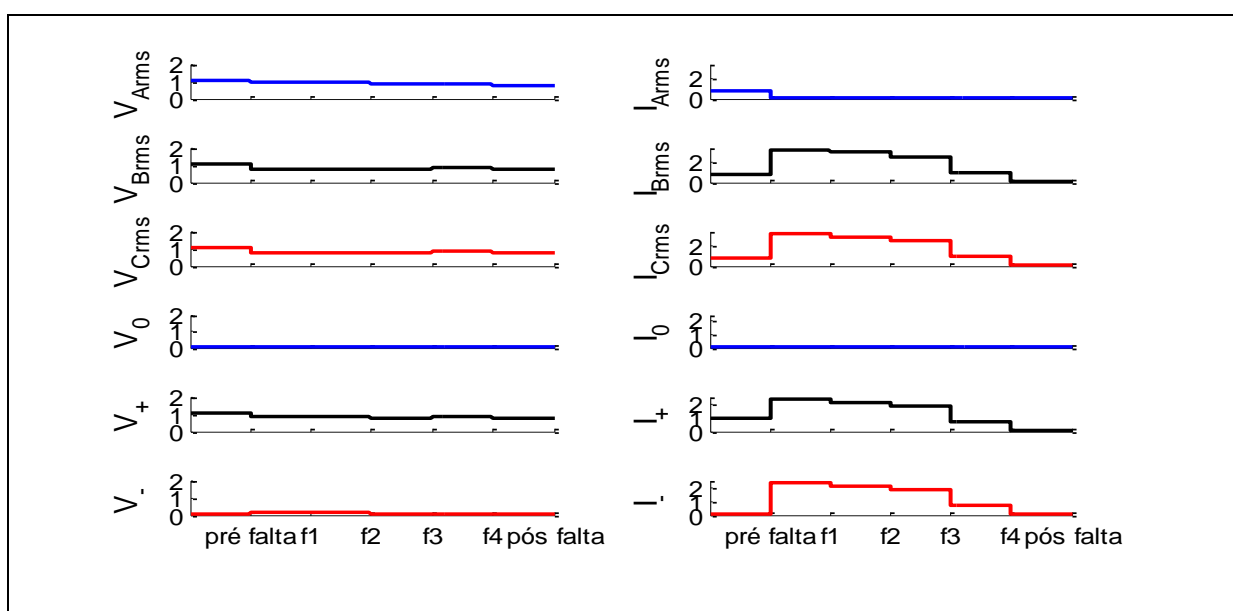


Figura 60: Análise das características extraídas em p.u.: caso 4

Fonte: Autoria própria.

Para confirmar a eficiência do método proposto a etapa de classificação foi realizada de forma manual, com os mesmos critérios dos casos anteriores.

Os dados do Quadro 11 correspondem com a seguinte classificação:

- Segmento pré falta:
 - $(V_- < 0,1\text{pu}) \text{ E } (I_- < 0,07\text{pu}) \text{ E } (I_+ < 1,1\text{pu}) = \text{“operação normal”}$
 - $(V_+ > 0,9\text{pu}) \text{ E } (I_+ > 0,05\text{pu}) \text{ E } (\text{“operação normal”}) = \text{“normal com carga”}$
- Segmento falta 1:
 - $(V_- > 0,1\text{pu}) \text{ OU } (I_- > 0,07\text{pu}) = \text{“falta desequilibrada”}$
 - $(V_0 < 0,05\text{pu}) \text{ E } (|(V_+) - (V_-)| > 0,2\text{pu}) \text{ E } (\text{“desequilibrada”}) = \text{“falta fase-fase no lado de alta”}$
 - $(V_B < 0,9\text{pu}) \text{ E } (V_C < 0,9\text{pu}) = \text{“fases B e C envolvidas”}$
- Segmento falta 2: Idem ao segmento falta 1
- Segmento falta 3: Idem ao segmento falta 2
- Segmento falta 4: Idem ao segmento falta 3
- Segmento pós falta:
 - $(V_- < 0,1\text{pu}) \text{ E } (I_- < 0,07\text{pu}) \text{ E } (I_+ < 1,1\text{pu}) = \text{“operação normal”}$
 - $(0,1\text{pu} < V_+ < 0,9\text{pu}) \text{ E } (I_+ < 0,05\text{pu}) = \text{“desenergização”}$
- Correlação segmentos pré falta e falta:
 - “normal com carga” evolui para “desequilibrada” = “falta com gerador sob carga”

Apesar de serem identificados vários segmentos de falta a classificação obtida para cada seguimento é coerente. Todos os segmentos de falta (de 1 a 4) tiveram a mesma classificação levando à conclusão que a falta persistiu por todo o intervalo destes. A evolução da pré falta para a falta 1 e da falta 4 para a pós falta também estão coerentes.

Esse caso corresponde a uma ocorrência rara em qualquer sistema elétrico, onde ocorreu a explosão do disjuntor de interligação da unidade geradora

com o sistema. Mesmo após a atuação da proteção de barra e desligamento completo da subestação a unidade geradora ainda continuou a contribuir para a falta devido a falha do dispositivo de isolação. Tanto as segmentações através da tensão quanto da corrente identificaram o instante inicial da falta, próximo dos 0,6 s, como mostra a Figura 58. A falta persistiu por quase 1 s e vários segmentos foram identificados devido às oscilações de tensão e corrente. Porém a segmentação falhou ao não detectar o real instante de desligamento inicial, em torno do instante 0,3 s, como pode ser visto na Figura 55. Como as variações subsequentes foram grandes, chegando a 5 pu, a energia do primeiro evento (desligamento das correntes em 0,3 s) foi comparativamente insignificante. Foram realizados testes de segmentação com outros coeficientes de detalhe ($cd1$ e $cd2$) e estes também não detectaram o instante de desligamento inicial. Isso mostra um ponto negativo no uso de um limiar relativo ao valor máximo. Porém mesmo com a identificação de vários segmentos, se observado o perfil geral das características extraídas, conforme Figura 66, e considerando os segmentos de falta como um único segmento é possível realizar a classificação da falta.

6.5 CASO 5: CONEXÃO AO SIN SEM CONDIÇÕES DE SINCRONISMO

Este estudo de caso avalia um registro de falta ocasionado pela conexão de um gerador ao sistema sem as condições de sincronismo estar atendidas. Ou seja, com ângulo entre tensões do gerador e do sistema acima dos valores aceitáveis. Esta ocorrência provocou danos aos transformadores elevadores da unidade. Este registro também foi disponibilizado para estudo por uma concessionária de geração de energia do SIN.

A Figura 61 mostra o registro de oscilografia de curta duração das correntes da unidade geradora e tensão da barra a qual o gerador é conectada ao SIN.

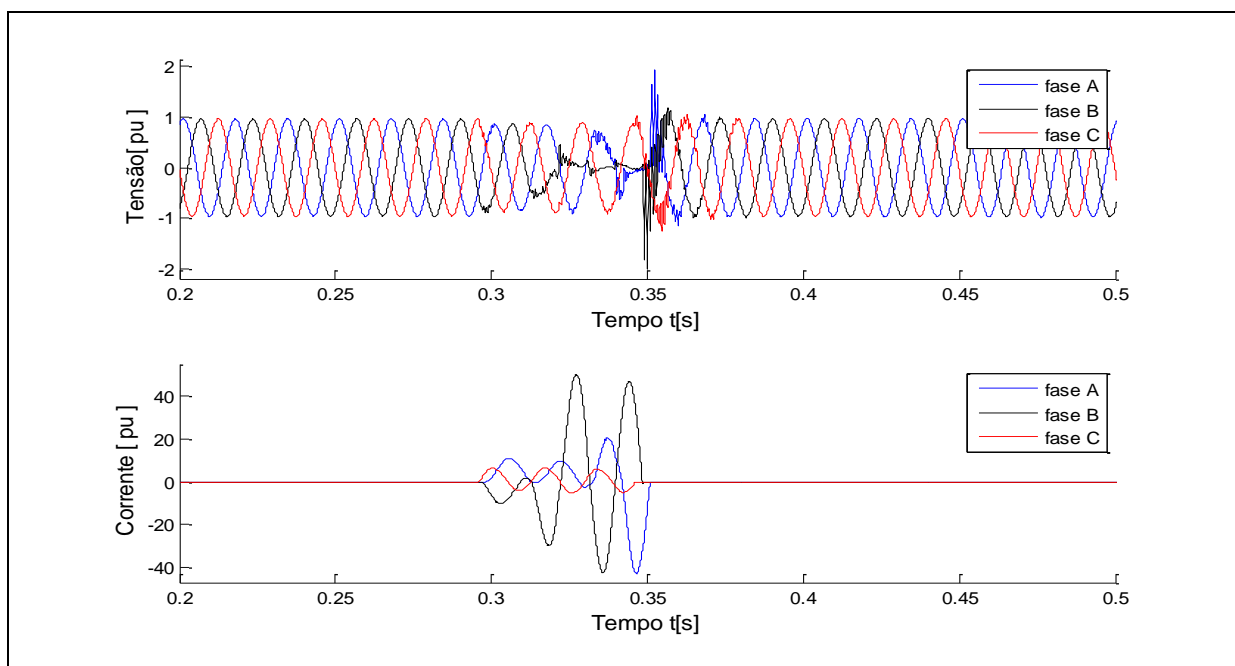


Figura 61: Visualização das correntes e tensões da unidade geradora, caso 5.
Fonte: Dados disponibilizados para estudo por concessionária de geração.

Os sinais de tensão do gerador não estavam disponíveis neste registro. Portanto a análise deve considerar apenas os segmentos pré falta e falta para a tensão, pois após a desconexão o sinal de tensão do sistema voltou aos valores normais.

Os sinais de corrente e tensão das três fases foram submetidos à análise com a DWT, com a *wavelet* mãe db4, após a mudança para base alfa-beta da transformada de Clarke-Concórdia. A energia dos coeficientes de detalhe, até o terceiro nível de decomposição, foi calculada e utilizada na detecção dos

transitórios. A Figura 62 mostra o resultado da detecção dos transitórios com base na variação da energia dos coeficientes de detalhe e no *universal threshold* para os sinais de tensão.

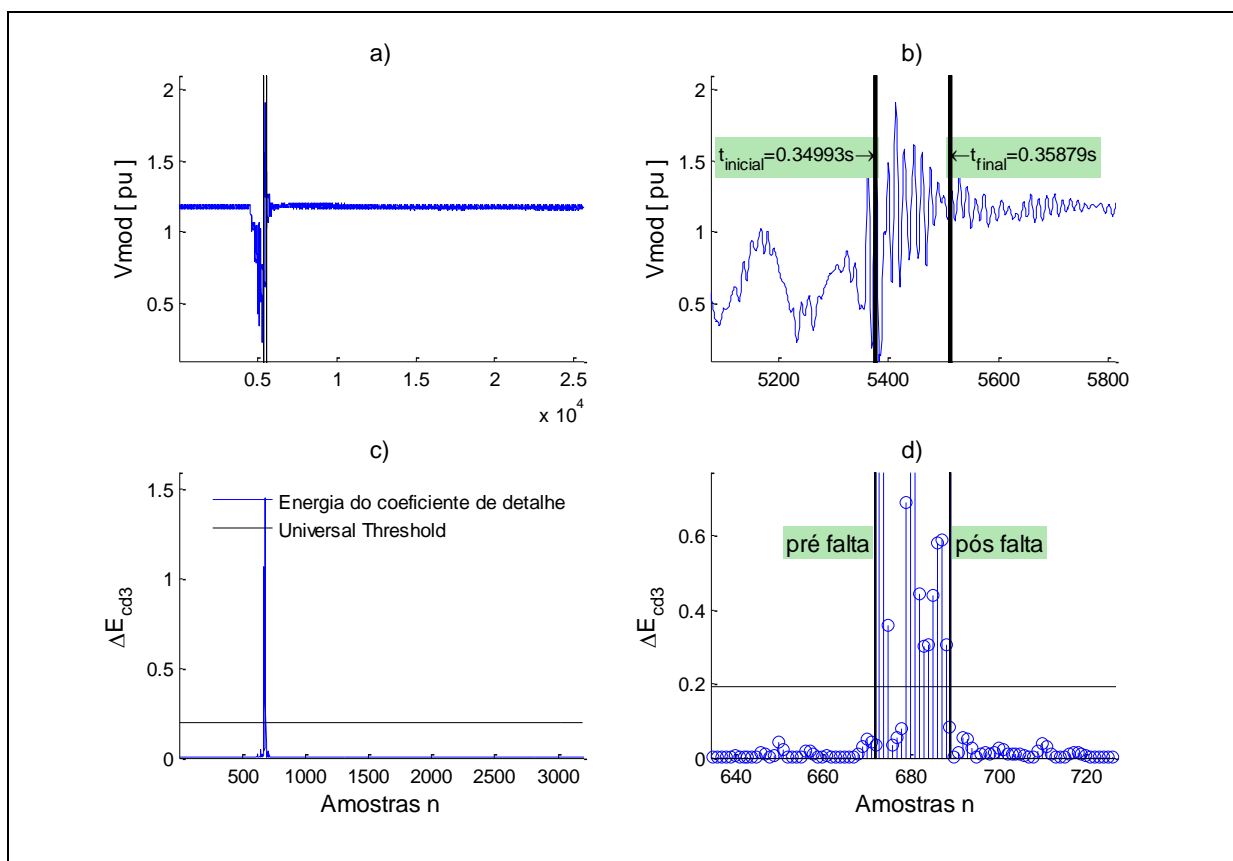


Figura 62: Detalhe da segmentação da tensão, caso 5.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 62 a) mostra o módulo dos sinais alfa-beta com destaque para o momento da ocorrência de transitório que é visto em detalhe na Figura 62 b). Verifica-se que ocorrem diversas variações bruscas na energia do coeficiente de detalhe, todas com duração de alguns ciclos. Os picos da variação de energia do coeficiente de detalhe 3 ultrapassam o *universal threshold* como mostra Figura 62 c). O detalhe da violação deste limite aparece na Figura 62 d) que também identifica os segmentos.

A Figura 63 mostra os detalhes da segmentação da corrente, com a mesma disposição de informações da Figura 62.

A Figura 64 mostra os sinais de tensão e corrente das três fases do gerador, por segmentos. As barras verticais representam a divisão dos segmentos. Para este caso tanto o processamento pela tensão quanto pela corrente produziram os segmentos pré falta, falta e pós falta.

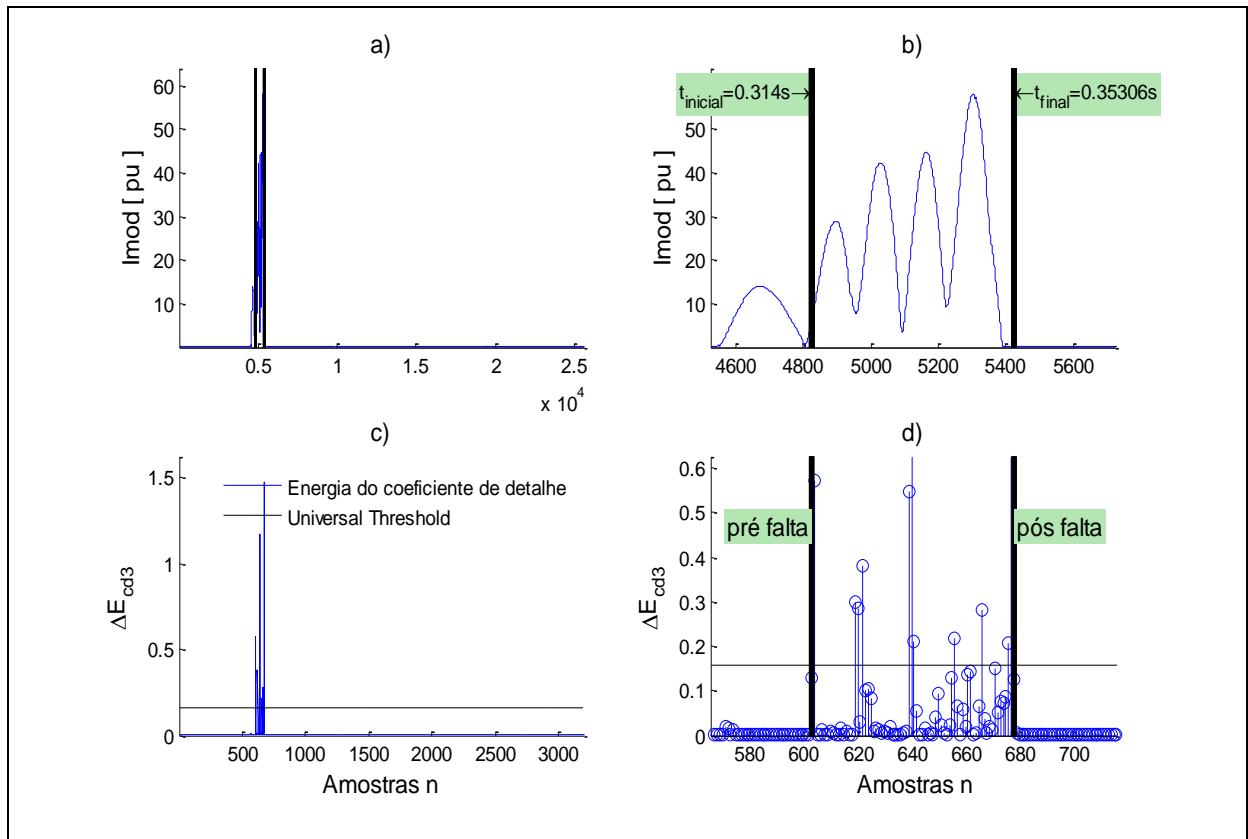


Figura 63: Detalhe da segmentação da corrente, caso 5.
Fonte: Autoria própria.

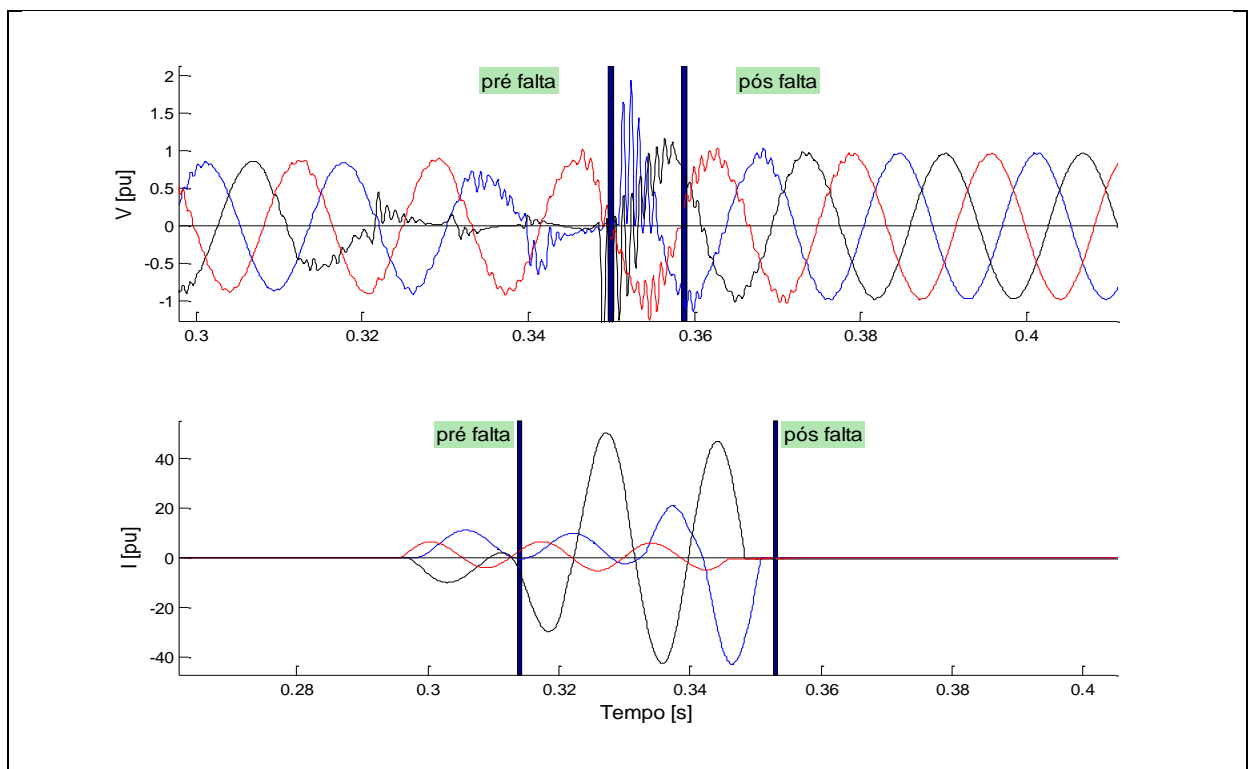


Figura 64: Sinais segmentados, caso 5.
Fonte: Autoria própria.

Para melhor visualizar a segmentação a Figura 65 mostra de forma individual cada sinal segmentado.

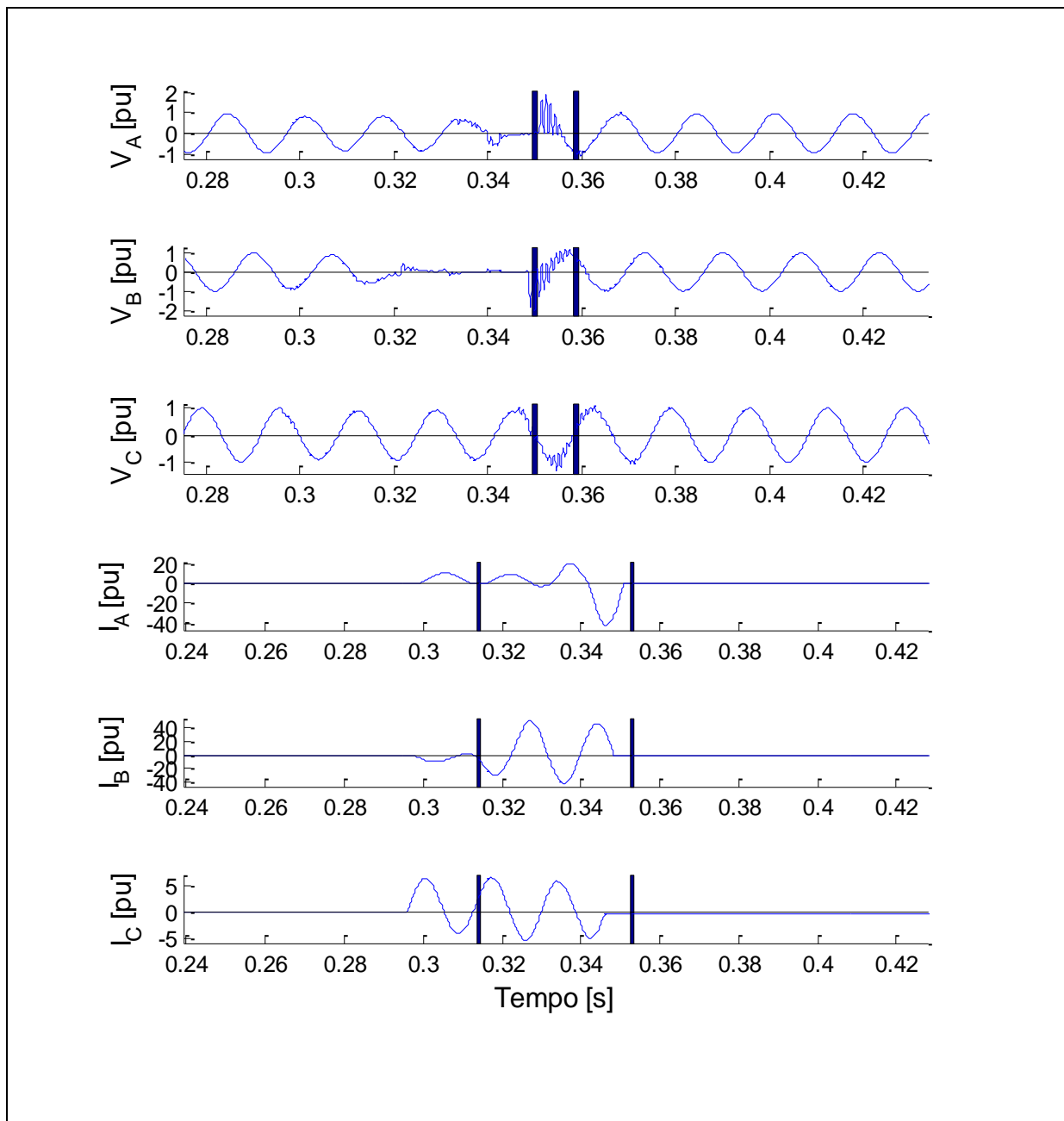


Figura 65: Sinais segmentados individualmente, caso 5.

Fonte: Autoria própria.

Como os sinais de tensão disponíveis neste registro não são da unidade geradora, mas sim do sistema, as características foram extraídas com base na segmentação dos sinais de corrente e são mostradas no Quadro 12, para cada segmento, de acordo com a metodologia proposta.

Características [p.u.]	Segmentos		
	Pré falta	Falta	Pós falta
V_{A_rms}	0,9591	0,7542	0,9618
V_{B_rms}	0,9512	0,4942	0,9609
V_{C_rms}	0,9569	0,8649	0,9497
I_{A_rms}	0,0000	16,1338	0,0523
I_{B_rms}	0,0000	28,6821	0,1035
I_{C_rms}	0,0000	3,7271	0,0660
V_0	0,0062	0,1743	0,0065
V_+	0,9557	0,6358	0,9607
V_-	0,0033	0,1582	0,0011
I_0	0,0000	4,2238	0,0422
I_+	0,0000	15,7569	0,0201
I_-	0,0000	7,9885	0,0133

Quadro 12: Características extraídas em p.u.: caso 5.

A Figura 66 mostra um maior afundamento na tensão das fases A e B e aumento das correntes das mesmas no segmento de falta. Verifica-se assim que o uso da corrente na segmentação também é viável.

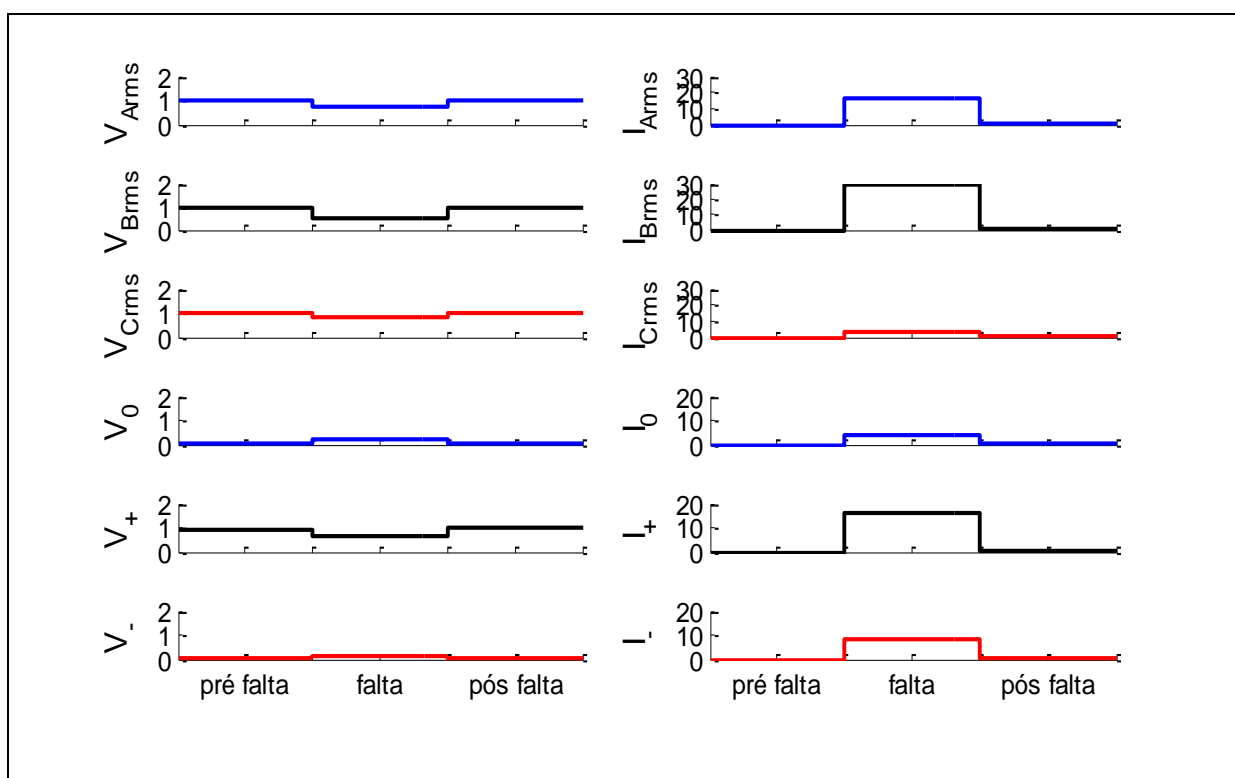


Figura 66: Análise das características extraídas em p.u.: caso 5.
Fonte: Autoria própria.

Para confirmar a eficiência do método proposto a etapa de classificação foi realizada de forma manual, com os mesmos critérios dos casos anteriores.

Os dados do Quadro 12 correspondem com a seguinte classificação:

- Segmento pré falta:
 - $(V_- < 0,1\text{pu}) \text{ E } (I_- < 0,07\text{pu}) \text{ E } (I_+ < 1,1\text{pu}) = \text{“operação normal”}$
 - $(V_+ > 0,9\text{pu}) \text{ E } (I_+ < 0,05\text{pu}) \text{ E } (\text{“operação normal”}) = \text{“normal sem carga”}$
- Segmento falta:
 - $(V_- > 0,1\text{pu}) \text{ OU } (I_- > 0,07\text{pu}) = \text{“falta desequilibrada”}$
 - $(V_A < 0,9\text{pu}) \text{ E } (V_B < 0,9\text{pu}) \text{ E } (V_C < 0,9\text{pu}) = \text{“fases A, B e C envolvidas”}$
- Correlação segmentos pré falta e falta:
 - “normal sem carga” evolui para “desequilibrada” = “falta com gerador em vazio”

A classificação obtida para o seguimento pré falta é coerente pois o gerador ainda estava desconectado do SIN e portanto sem carga. A conclusão pelo envolvimento das três fases também está correta pois em um fechamento fora das condições de sincronismo ocorrem diferenças de tensão e sobrecorrentes em todas as fases. Porém pelas correntes de fase verifica-se que o curto-circuito de maior amplitude ocorreu nas fases A e B, isto condiz com o relatório da concessionária que confirmou a ocorrência de danos internos em duas fases do banco monofásico de transformadores elevadores.

O caso 5 também mostra uma ocorrência incomum, o fechamento do disjuntor de conexão com o sistema elétrico quando o gerador estava fora das condições de sincronismo (tensão, ângulo de fase e frequência). Com a atuação das proteções do transformador elevador, devido aos danos que este sofreu, houve a abertura do disjuntor e eliminação da falta. A segmentação tanto pela tensão quanto pela corrente obtiveram resultados similares e corretos, detectando um único segmento de falta de curta duração.

6.6 ANÁLISES QUALITATIVAS E QUANTITATIVAS

Analisando os resultados dos estudos de casos algumas observações podem ser feitas e conclusões retiradas.

Os casos 1, 2 e 3 representam ocorrências relativamente comuns em unidades geradoras. Os casos 2 e 3 dispunham de mais do que um registro para análise. A análise de registros similares obteve resultados análogos, confirmando os obtidos no estudo de caso. Foram testados dois registros de perda de excitação (caso 2) e três de reversão de potência (caso 3). Assim podem-se generalizar as conclusões retiradas destes.

Comparando a segmentação pela tensão e pela corrente nos cinco estudos de caso verifica-se um melhor resultado na segmentação através da tensão. A detecção de transitórios e segmentação com base na corrente se mostrou menos eficiente por:

- Ser susceptível a variações características de arco elétrico em casos de curto-circuito. Frequências do arco elétrico influenciam na variação do sinal de energia dos coeficientes de detalhe *wavelet* provocando erro na detecção dos transitórios;
- Ser susceptível ao tipo de carga que o gerador estava alimentando. As harmônicas geradas pelo chaveamento de cargas podem aparecer nos sinais dos coeficientes de detalhe e criar variações de energia destes sinais que se tornam significativas no processo de segmentação;
- Ser susceptível ao carregamento pré falta do gerador. Caso o gerador esteja operando com carregamento baixo na pré falta as variações de energia dos coeficientes de detalhe *wavelet* não são representativos, pois podem não ocorrer variações bruscas, dependendo do tipo de falta.

Comparativamente com outros estudos para identificação de transitórios em sinais de oscilografia podem-se fazer alguns comentários:

- O método de Costa (2010) é baseado na variação brusca da energia dos coeficientes de detalhe *wavelet* dentro de uma janela de quatro amostras. Com o objetivo de disparar o *trigger* dos RDPs para qualquer tipo de

anormalidade no sinal o método é eficiente. Porém para análise de registros completos contendo informações de falta o método é susceptível a detectar outras variações no sinal que não as de interesse;

- A principal diferença entre o método proposto com o método desenvolvido por Costa (2010) é que este não olha o registro como um todo, apenas a janela de 4 amostras. Já o *universal threshold* tem uma componente estatística que o torna relativo à maior variação de energia (pico) dos coeficientes calculados para o registro como um todo. E o objetivo é olhar para o registro completo, localizar os instantes de falta e ainda desprezar outras variações que não estejam relacionadas a falta;
- O *universal threshold* tem característica de ser relativo ao valor máximo da variação de energia do coeficiente de detalhe *wavelet*. Por isto, em casos com vários transitórios, os de baixa amplitude podem não ser detectados. Assim também, se não houver um transitório de alta amplitude, pode ocorrer a detecção de oscilações não relacionadas à falta.

A análise das características extraídas em cada estudo de caso mostrou que há coerência nos valores com as faltas reais. O conjunto de características extraídas contém informações representativas que permitem submetê-las a métodos de classificação. Mesmo o caso 4, composto por vários transitórios e que produziram vários segmentos, se analisado como um único segmento pode ser submetido a sistemas de classificação da faltas.

A classificação manual feita a partir dos dados resultou na correta identificação das faltas para os cinco estudos de casos reais realizados, validando assim o método de segmentação proposto neste trabalho.

Comparando o processo de análise manual com a análise automática de oscilografias enumeram-se algumas vantagens para a automática:

- Reduzir o tempo de análise em torno de algumas horas ao apontar rapidamente o instante de desligamento e as variáveis mais afetadas. No processo de análise manual o especialista terá de percorrer todos os registros de todos os RDPs em busca da origem da perturbação;
- Apontar diretamente para as causas primárias de um desligamento. Na análise manual o especialista avalia o comportamento das variáveis medidas,

- como correntes de curto circuito e afundamentos de tensão para posteriormente relacionar, com base em sua experiência, com as causas. A análise automática pode extrair características típicas de ocorrências como curto circuito causado por queimadas, descargas atmosféricas, falha em isoladores, falhas intrínsecas de transformadores de potência ou de medição;
- A implementação de um SEs na etapa de classificação permite utilizar-se da experiência dos analistas humanos de forma automatizada. Ainda uma etapa de classificação baseada em RNAs pode ampliar sua base de conhecimento de forma dinâmica com o acúmulo do número de registros analisados.

7. CONCLUSÕES

A realização desta pesquisa permitiu a revisão de conceitos matemáticos e de processamento digital de sinais, em especial, adquirir novos conhecimentos teóricos sobre a transformada *wavelet*. A transformada *wavelet* pode, simplificada, ser definida como uma generalização da transformada de Fourier.

Definiu-se uma metodologia capaz de segmentar e extrair características de ocorrências no sistema elétrico a partir dos dados de registros de oscilografias de curta duração de unidades geradoras. O método proposto faz uso da transformada *wavelet* no processo de segmentação dos registros de oscilografia e foi resultado da adaptação de dois outros métodos já testados, porém ambos com finalidades diferentes. O método foi implementado em um algoritmo e testado com sucesso em cinco estudos de caso. Com a aplicação da transformada *wavelet* nos estudos de caso verificou-se a eficiência do método para a análise de oscilografias de unidades geradoras. A família de *wavelets* de Daubechies é a mais utilizada em análises de sinais não estacionários. Os coeficientes de detalhes *wavelet* contêm informações que permitem identificar o instante da ocorrência de transitórios em registros de oscilografias de unidades geradoras de energia elétrica. O cálculo do limiar universal sobre a variação da energia dos coeficientes de detalhe *wavelet* é um método eficiente para localizar os transitórios e pode ser implementado através de algoritmos.

Nos testes realizados com diversas *wavelets* mãe da família Daubechies obteve-se os melhores resultados com a Daubecheis de quarta ordem (db4). No método proposto a escolha do coeficiente de detalhe é dinâmica e função do maior limiar universal obtido, porém nos testes este sempre coincidiu com o coeficiente de detalhe três (cd3).

Foi possível concluir, nos estudos de caso que os sinais de tensão são mais adequados para o processo de segmentação, porém as informações contidas nos sinais de corrente são úteis para a análise posterior e classificação da ocorrência. A segmentação é uma etapa de grande importância na extração de características de cada trecho para comparação com características típicas de faltas conhecidas e assim determinar a causa do desligamento. Esta comparação pode,

em uma etapa posterior, ser realizada através de um sistema especialista que contenha na sua base de conhecimento as informações usadas por analistas humanos emulando uma análise manual.

Com a aplicação desta metodologia espera-se aperfeiçoar o processo de análise pós-operação de ocorrências no SIN, tendo como resultado direto a redução no tempo de indisponibilidade de equipamentos, como geradores. Espera-se que a aplicação da metodologia de diagnóstico automático de ocorrências tenha impacto significativo na redução do tempo necessário para se obter uma análise do defeito e sua origem, dessa forma diminuindo as durações das contingências que ocorrem no setor elétrico, como desligamentos e cortes de carga. Além disso, a aplicação desse tipo de ferramenta é de interesse das concessionárias de energia, uma vez que facilita o trabalho do engenheiro analista além de diminuir o risco de multas devido ao tempo em que um gerador permanece fora de serviço indevidamente. Sendo assim, há um aumento na confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, fator fundamental para o desenvolvimento do país.

Os resultados obtidos nos estudos de caso reais realizados foram validados através de um processo de classificação manual. Em um sistema real esta etapa pode ser automatizada com o desenvolvimento de um sistema especialista e melhorado correlacionando com dados de sequência de eventos e análises de oscilografias de longa duração.

Ao longo do andamento dos estudos foram identificadas algumas possibilidades de prosseguimento deste e que podem gerar trabalhos futuros, sendo elas:

- Aperfeiçoar o método para correlacionar a análise de oscilografias de mais de uma unidade geradora em usinas de grande porte;
- Estudar a implementação do método integrada a dispositivos eletrônicos, como processadores digitais de sinais (DSPs), possibilitando seu uso integrado a RDPs;
- Aprofundar o estudo e aprimorar o método de segmentação para faltas com vários transitórios ou faltas evolutivas e;
- Propor nova *wavelet* mãe adequada a cada tipo de desligamento;

REFERÊNCIAS

ANDERSON, Paul M. **Power System Protection**. New York: IEEE Press, 1998.

ANEEL. **Qualidade da Energia Elétrica**: Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional, módulo 8. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008.

ANEEL. Resolução normativa nº 115, de 29 de novembro de 2004. **Diário oficial 03.12.2004**, Brasília - DF. seção 1, p. 74, v. 141, n. 232.

BRITO, Núbia S. D.; SOUZA, Benemar A. D.; COSTA, Flávio B. **Automação na análise de ocorrências**: a contribuição da Chesf para o desenvolvimento de novas técnicas. III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Belém - PA: Sociedade Brasileira de Automática. 2010. p. 1 a 6.

CÂNDIDO, Crisluci K. S. S.; MEDEIROS JR., M. Firmino de; OLIVEIRA, J. Tavares de. **Classificação de distúrbios na rede elétrica usando redes neurais e wavelets**. Anais do IX Congresso Brasileiro de Redes Neurais / Inteligência Computacional - IX CBRN. Ouro Preto: Sociedade Brasileira de Redes Neurais. 2009.

CARDOSO, Rafael. Guia prático para configuração, coleta e utilização de oscilografias em relés digitais. Disponível em: <<http://www.selinc.com.br>>. Acesso em: 25 de outubro de 2013.

CARVALHO, Tadeu F. D.; D'OTAVIANO, Itala M. L. Sobre Leibniz, Newton e infinitésimos, das origens do cálculo infinitesimal aos fundamentos do cálculo diferencial paraconsistente. **Educação Matemática Pesquisa**, São Paulo, 2006. 13-43.

CASTRO, Armardo A. M. de; PRADO, Pedro P. L. de. Algoritmos para reconhecimento de padrões. **Revista Ciências Exatas**, Taubaté, v. 8, p. 129-145, 2002.

CIESLAK, Dionatan A. G.; MORETO, M. **Um esquema para diagnóstico automático de unidades geradoras de energia elétrica usando registros fasoriais e lógica nebulosa**. Anais do V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Foz do Iguaçu - PR, Brasil: ISSN 2177-6164. 2014.

COSTA, F. B et al. **A tool for fault and power quality disturbance analysis in oscilographic records**. International Youth Conference on Energetics. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. Trabalho completo.

COSTA, Flávio B. **Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na transformada wavelet para uso em registradores digitais de perturbação**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). ed. Campina Grande - PB: Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

DAUBECHIES, Ingrid. The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis. **IEEE Transactions on information theory**, setembro de 1990. 961-1005.

DAUBECHIES, Ingrid. **Ten Lectures on Wavelets**. Vermont: Capital city Press, 1992.

DAVILA, H. Records from DFRs vs. Records from microprocessor-based relays. **Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America**, nov. 2010. 635-644.

DELMONT, Odilon F. et al. **Utilização da transformada wavelet e RNAs para caracterização de distúrbios na qualidade de energia**. Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica - V SBQEE. Aracaju: CIGRÉ. 2003. p. 381 a 386.

FARIA, Luiz et al. Training Control Centers' Operators in Training Control Centers' Operators in Using Intelligent Tutoring Systems. **Learning Technologies, IEEE Transactions on**, v. 2, n. IEEE Computer Society, p. 135 - 147, April-June 2009.

GHIJSELEN, Jozef A. L.; BOSSCHE, Alex P. M. V. D. Exact Voltage Unbalance Assessment Without Phase Measurements. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, 2005. vol. 20, no. 1, pp. 519 – 520.

GIOVANINI, Renan et al. SPERT - Sistema Integrado para Análise de Perturbações. **IX Seminário Técnico de Proteção e Controle (IX STPC)**, Belo Horizonte - Brasil, 2008. CD-ROM.

GRANDO, Flavio L. et al. **Desenvolvimento de uma PMU de baixo custo para medição de sincrofasores em nível de distribuição**. XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Natal - RN: [s.n.]. 2015. p. 1925-1930.

GUAN, Yufan; KEZUNOVIC, Mladen. A novel fault classification approach using manifold learning algorithm. **16th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP)**, 2011. 1 - 6.

IEEE STD. **C37.111-2013**: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems. 2ª. ed. New York - USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2013.

IEEE STD. **C37.111-1999**: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems. 1ª. ed. New York - USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1999.

KEZUNOVIC, M; LIAO, Y. **Automated analysis of power quality disturbances**. CIRE2001. 16ª International Conference and Exhibition. Texas A&M University, USA: (IEE Conf. Publ No. 482). 2001. p. 5 vol 2.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto-circuito**. 4ª. ed. Florianópolis: Edição do autor, 2007.

LACHMAN, Márcio. **Sistema de Monitoração Remota e Avaliação do Estado Operativo de Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs) Instalados em Subestações em Operação**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis - SC: Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). 2007.

LENZ, Everton P.; ROLIM, Jacqueline G. **Avaliação automática do desempenho de relés multifuncionais de proteção de unidades geradoras**. Anais do IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Brasília: SBA. 2009.

LIN, Ying-Hong; LIU, Chih-Wen; YU, Chi-Shan. A New Fault Locator for Three-Terminal Transmission Lines—Using Two-Terminal Synchronized Voltage and Current Phasors. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, April 2002. 452-459.

MALLAT, Stephane G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. **IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence**, julho de 1989. 674-693.

MENESES, Lair; ROCHA, Luiz. **Sistema inteligente de processamento de oscilografia para identificação e classificação de faltas em sistemas de energia elétrica**. IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de Educação Tecnológica. Belém - PA: IV CONNEPI. 2009.

MISITI, Michel et al. **Wavelet Toolbox: User's Guide**. R2014a. ed. www.mathworks.com: The MathWorks, Inc., 2014.

MIX, Dwight F.; OLEJNICZAK, Kraig J. **Elements of Wavelets for Engineers and Scientists**. New Jersey: Wiley-interscience, 2003.

MORETO, Miguel. **Análise automática de registros digitais de perturbações em unidades geradoras**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). ed. Florianópolis - SC: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2011.

MORETO, Miguel; ROLIM, Jacqueline G. Análise automática de oscilografias em sistemas elétricos de potência. **Revista Controle & Automação**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 347-362, Julho e Agosto 2010.

OLIVEIRA, Hélio M. D. **Análise de sinais para engenheiros: uma abordagem via Wavelets**. Rio de Janeiro: Brasport, 2007.

ONS. **Análise de perturbação**: Procedimentos de rede, submódulo 22.3. Rio de Janeiro: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2009.

ONS. **Registro de Perturbações**: Procedimentos de Rede, submódulo 11.6. Rio de Janeiro: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2009.

ONS. **Requisitos Mínimos para os Sistemas de Proteção e de Telecomunicações**: Procedimentos de Rede, submódulo 2.6. Rio de Janeiro: Operador Nacional do Sistema, 2011.

PARRAGA, Adriane. **Aplicação da transformada wavelet packet na análise e classificação de sinais de vozes patológicas**. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). ed. Porto Alegre - RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

PEREIRA, Roberto M.; SPRITZER, Ilda M. D. P. A. Automação e digitalização em subestações de energia elétrica: um estudo de caso. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 3, n. 4, p. 147-160, 2007.

PEREIRA, Sidnei; MORETO, Miguel. **Diagnóstico automático de faltas em subestações de transmissão de energia elétrica utilizando sequência de eventos**. Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ - XV eriac. Foz do Iguaçu - PR: Organização ITAIPU BINACIONAL. 2013.

PEREZ, Joe; RINCON, Cesar. **A guide to transformer digital fault recording event analysis**. Protective Relay Engineers, 2012 65th Annual Conference for. College Station, TX: [s.n.]. 2012. p. 358 a 373.

REASON. **Manual de instruções RPV 310**. Florianópolis - SC: Reason Tecnologia S.A, 2010.

SANTOS, Athila Q. et al. **Ferramenta multi arquivos para visualização e manipulação oscilográfica de sinais elétricos**. Anais do XIX Congresso Brasileiro de automática, CBA 2012. Campina Grande: ISBN: 978-85-8001-069-5. 2012. p. 4960 a 4967.

SILVA, Jaqueline F. D.; DUARTE, Marco A. Q.; VILLAREAL, Francisco. **Um método para codificação de imagens comprimidas no domínio wavelet**. 10ª Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações - 2011. Águas de Lindóia: DINCON. 2011.

SILVA, Milthon S. **Sistema de monitoramento e metodologia de estimativa dos tempos de operação do disjuntor**. Universidade de São Paulo. São Paulo: Tese (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Energia e Automação Elétricas). 2005. p. 116.

SILVA, Murilo D.; OLESKOVICZ, Mário; COURY, Denis V. Uma nova ferramenta baseada na transformada wavelet para localização digital de faltas. **Revista Controle & Automação**, São Carlos - SP, v. 16, n. 3, p. 345 a 358, Agosto e Setembro de 2005.

UKIL, Abhisek ; ZIVANOVIC, Rastko. Abrupt change detection in power system fault analysis using adaptive whitening filter and wavelet transform. **Electric Power Systems Research: Science Direct**, 2006. 815–823.

UKIL, Abhisek; ZIVANOVIC, Rastko. The detection of abrupt changes using recursive identification for power system fault analysis. **Electric Power Systems Research: Science Direct**, 2007. 259–265.

USIDA, Wesley F. et al. Análise qualitativa no monitoramento automático dos eventos de tensão de curta duração. **Revista Controle & Automação**, julho, agosto e setembro de 2009. 323 a 334.

VARELA, Fernando S. et al. Sistema inteligente de gestão de oscilografias. **XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XX SNPTEE)**, Recife - Brasil, 2009. CR-ROM.

WEEKS, Michael. **Processamento Digital de Sinais Utilizando MATLAB e Wavelets**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

YIN, Haiping; FAN, Lingling. **PMU data-based fault location techniques**. North American Power Symposium (NAPS). Arlington, TX: IEEE. 2010. p. 1 - 7.

ZHU, Yanwei; SHI, Xinchun; DAN, Yangqing. Deduction of coordinate transform for instantaneous reactive power theory and analysis on relationship between $\alpha - \beta$ and dq0 transformation. **9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments ICEMI '09**, Beijing, 16-19 Aug 2009. 4-922 - 4-925.