

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

GEYSON BRUSTOLIN

DETECÇÃO E ANÁLISE DE EVENTOS DE ILHAMENTO
UTILIZANDO DADOS FASORIAIS SINCRONIZADOS E A
TRANSFORMADA *WAVELET* DISCRETA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a. Dra. Jacqueline G. Rolim.
Coorientador: Prof. Dr. Ildemar C. Decker.

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Brustolin, Geyson

Detecção e análise de eventos deilhamento utilizando dados fasoriais sincronizados e a transformada wavelet discreta / Geyson Brustolin ; orientadora, Jacqueline Gisèle Rolim ; co-orientador, Ildemar Cassana Decker. - Florianópolis, SC, 2013.
195 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Transformada Wavelet Discreta. 3. Medição Fasorial Sincronizada. 4. Ilhamento. 5. Esquema Regional de Alívio de Carga. I. Rolim, Jacqueline Gisèle. II. Decker, Ildemar Cassana. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Geyson Brustolin

**DETECÇÃO E ANÁLISE DE EVENTOS DE ILHAMENTO
UTILIZANDO DADOS FASORIAIS SINCRONIZADOS
E A TRANSFORMADA *WAVELET* DISCRETA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Grau de
"Mestre em Engenharia Elétrica", e aprovada em sua forma final pela
Universidade Federal de Santa Catarina.


Florianópolis, 12 de Julho de 2013.



Prof. Patrick Kuro Peng, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Prof. Jacqueline G. Rolim, D. Eng.

Orientadora



Prof. Idemar Cassana Decker, D. Sc.

Co-orientador



Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.



Prof. Miguel Moreto, D. Eng.



Prof. André Luis Dulcastagne, D. Eng.

*Aos meus pais Nelson Pedro
Brustolin e Maria Elizabete Brustolin e à
minha irmã Thayse Brustolin que me
incentivaram durante todo o meu trabalho,
me animaram nos momentos difíceis,
sorriram com minhas conquistas e
colocaram minha felicidade e estudo
acima de suas próprias prioridades.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que com sua compaixão criou as oportunidades para que eu pudesse trilhar esse caminho e por todas as coisas boas que já me aconteceram.

Ao Ildemar Cassana Decker, que acreditou em meu potencial e me inseriu na grande família LabPlan, transmitindo seus conhecimentos com total dedicação, suprimindo todas as dúvidas que surgiam ao longo do caminho e que me incentivou a entrar no programa de mestrado e por dar apoio nas decisões que tomei durante esse período.

À Jacqueline Gisele Rolim, que ajudou para que o trabalho pudesse ser concretizado e permitindo que eu manuseasse e aumentasse meus conhecimentos sobre os relés digitais presentes no Laboratório de Proteção do Sistema Elétrico (LapSe).

Ao Marcelo Neujahr Agostini, que se responsabilizou por me ensinar a dar os primeiros passos no LabPlan e por me ajudar nos mais diferentes tipos de dificuldades que enfrentei durante todo o tempo em que estive no laboratório.

Aos grandes amigos do Projeto MedFasee Thiago Jeremias, Fábio Matheus Mantelli, Pedro César Cordeiro Vieira, Valmor Zimmer, Rodolfo Bialecki Leandro, Marcelo Benetti, Paulo André Sehn da Silva, Luís Bernardo Timboni Baran, Renan Alves de Freitas e Rafael Henrique Eckstein que colaboraram para este trabalho.

Aos demais colegas do LabPlan e colegas de mestrado, no qual tive o prazer da convivência. Sempre me ajudando a aprender os conteúdos das disciplinas, nas resoluções dos trabalhos propostos. Todos sempre alegres e sorrindo, fazendo o dia transcorrer da melhor forma possível.

Aos professores do LabPlan e do curso de Pós-Graduação, que se dedicaram em ensinar os conhecimentos que possuem e compartilhando as experiências vividas com os alunos e incentivando-os a superar cada desafio que aparecia nos conteúdos.

Agradeço à minha família, cujo carinho, amor e dedicação sempre serviram como exemplo para que eu superasse todos os desafios que já enfrentei e por sempre estarem presentes em todos os bons momentos e por estarem perto nos momentos difíceis da minha vida.

Agradeço também à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina (FEESC) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por terem criado condições para o estudo e desenvolvimento deste trabalho.

*A mente que se expande a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.*
(Albert Einstein)

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia para a detecção e análise de eventos de ilhamento do Sistema Elétrico de Potência (SEPs) baseada em dados do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) e fazendo uso da técnica de processamento de sinais denominada Transformada *Wavelet* Discreta (TWD).

Além da detecção de eventos de ilhamento, a metodologia avalia o desempenho da atuação do Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC), detecta o instante de perda de interligação do sistema elétrico, bem como seu possível restabelecimento. A cada evento detectado, é apresentado um relatório contendo a localização gráfica, a hora e os valores instantâneos de frequência de cada detecção realizada.

Para validação da metodologia proposta são utilizadas informações do subsistema Acre-Rondônia/SIN, uma interligação recente e que ainda apresenta desafios para a sua operação estável. Com o uso da metodologia proposta, a avaliação do desempenho dos eventos monitorados torna-se mais rápida, podendo observar os valores alcançados através de uma tabela de desempenho e também observando graficamente os instantes de tempo de cada evento.

Palavras-chave: Medição Fasorial Sincronizada, Transformada *Wavelet* Discreta, Ilhamento, Esquema Regional de Alívio de Carga.

ABSTRACT

This work proposes a methodology for the detection and analysis of islanding events in the Electric Power System (EPS), using synchrophasors acquired from the Synchronized Phasor Measurement System (SPMS) and applying a signal processing technique called Discrete *Wavelet* Transform.

In addition to islanding detection events, the developed methodology analyses the performance of the Brazilian Load Shedding Scheme (named ERAC), the loss of interconnection and its possible recovery. For each detected event, a report is presented to the user, showing in a graph the location, time, and the instantaneous frequency values of each detection performed.

This work is focused on the Acre-Rondônia/SIN subsystem, a recent interconnection which still presents challenges for stable operation. Using the proposed methodology, the study of the monitored events becomes more rapid and the results are presented through a performance table and also graphically.

Keywords: Synchronized Phasor Measurement System, Discrete *Wavelet* Transform, Load Shedding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Componentes de um sistema SCADA.....	8
Figura 2.2 – Exemplos de Interface Homem Máquina.....	10
Figura 2.3 – Exemplo de SMFS.....	15
Figura 2.4 – Estrutura básica de uma PMU.....	15
Figura 2.5 – Resumo cronológico da <i>Wavelet</i>	19
Figura 2.6 – Aplicação da Transformada <i>Wavelet</i> em Sistemas de Energia Elétrica.....	21
Figura 2.7 – Um chapéu sombreiro - adereço da tradição do México.....	25
Figura 2.8 – <i>Wavelet</i> Chapéu Mexicano.....	25
Figura 2.9 – <i>Wavelet</i> de Morlet.....	26
Figura 2.10 – <i>Wavelet</i> de Haar.....	27
Figura 2.11 – <i>Wavelet</i> de Daubechies Db15.....	28
Figura 2.12 – Sinal com frequências distintas.....	31
Figura 2.13 – Escalonamento e translação da <i>wavelet</i> no sinal original.....	31
Figura 2.14 – Novo Escalonamento e translação.....	32
Figura 2.15 – Gráfico Translação x Escala.....	32
Figura 2.16 – Gráfico Deslocamento x Escala do exemplo.....	33
Figura 2.17 – Coeficientes de aproximação e detalhamento do sinal exemplo.....	36
Figura 2.18 – Resumo da divisão de banda do exemplo.....	37
Figura 2.19 – Coeficientes de detalhamento cd1 do sinal exemplo.....	39
Figura 2.20 – Saída após a filtragem do HWT.....	40
Figura 2.21 – Exemplo de SWT (SIQUEIRA, 2011).....	41
Figura 3.1 – Dois subsistemas interconectados.....	44
Figura 3.2 – Tensão em regime permanente.....	45
Figura 3.3 – Pequena variação de frequência.....	45
Figura 3.4 – Abertura angular com pequena variação.....	46
Figura 3.5 – Instabilidade de frequência.....	47
Figura 3.6 – Instabilidade angular.....	47
Figura 3.7 – Classificação das técnicas de detecção de ilhamento.....	48
Figura 3.8 – Fluxograma da metodologia desenvolvida.....	54
Figura 3.9 – Janela deslizante para análise do sinal.....	55
Figura 3.10 – Análise da TWD no aplicativo.....	56
Figura 3.11 – Coeficientes de Aproximação.....	57
Figura 3.12 – Coeficientes de Detalhamento.....	57
Figura 3.13 – Diferença angular entre UFMT e UNIR em 24/11/2011 durante a abertura da interligação AC-RO/SIN.....	59

Figura 3.14 – Frequência da PMU UNIR em 24/11/2011	60
Figura 3.15 – Diferença angular entre UFMT e UNIR em 24/11/2011 durante o restabelecimento da interligação AC-RO/SIN.	62
Figura 3.16 – Módulos de análise do DFAM.....	63
Figura 3.17 – Janela de abertura do DFAM	64
Figura 3.18 – Janela de Funcionalidades - DFAM	65
Figura 3.19 – Lista de aplicativos externos - DFAM.....	66
Figura 3.20 – Vista principal do programa.	67
Figura 3.21 – Ambiente “Dados”	68
Figura 3.22 – Ambiente “Relatório de Resultados”.....	68
Figura 3.23 – Análise da oscilação eletromecânica pelo método de Prony.....	70
Figura 3.24 – Estrutura dos Menus.	71
Figura 3.25 – Valores do ERAC.	72
Figura 3.26 – Cadastro de PMUs.	72
Figura 3.27 – Pontos de detecção.	73
Figura 4.1 – Sistema Interligado Nacional (fonte: ONS).....	77
Figura 4.2 – Fontes geradoras de eletricidade no Brasil.	78
Figura 4.3 – Sistema Acre-Rondônia.	80
Figura 4.4 – Configuração do Sistema no Horizonte 2014.	81
Figura 4.4 – <i>Capacitor Commutated Converter Back-to-Back</i>	82
Figura 4.6 – Estrutura atual do monitoramento do SIN.	86
Figura 4.7 – Exemplo da padronização de cores e símbolos adotada.....	94
Figura 4.8 – Localização geográfica dos eventos de 12/06/2011.....	95
Figura 4.9 – Localização temporal dos eventos de 12/06/2011.....	96
Figura 4.10 – Tensão trifásica na PMU UNIR de 12/06/2011.....	96
Figura 4.11 – Diferença angular (Referência: UFSC) de 12/06/2011.....	97
Figura 4.12 – Diferença angular UNIR/UFSC de 12/06/2011.	97
Figura 4.13 – Frequência do sistema durante o caso de estudo I.....	98
Figura 4.14 – Frequência na PMU UNIR durante o 1º estágio do ERAC.....	98
Figura 4.15 – Tela com resultados da análise de 12/06/2011.....	99
Figura 4.16 – Resultados do Ambiente Relatório de Resultados.	101
Figura 4.17 – Coeficiente de aproximação de todo o sinal.	101
Figura 4.18 – Coeficientes de detalhamento em cada iteração.....	102
Figura 4.19 – Pontos candidatos no sinal de entrada.	103
Figura 4.20 – Janela ampliada com os eventos detectados.	103
Figura 4.21 – Momento da abertura da interligação.	104
Figura 4.22 – 1º estágio do ERAC.	105
Figura 4.23 – Localização geográfica dos eventos de 27/05/2011.....	106
Figura 4.24 – Gráfico de tensão durante a perturbação.	107

Figura 4.25 – Gráfico da diferença angular durante a perturbação (Referência: UFSC).....	107
Figura 4.26 – Diferença angular UNIR/UFSC de 27/05/2011.	108
Figura 4.27 – Gráfico de frequência do estudo de caso II.....	109
Figura 4.28 – Primeiro zoom da frequência.	109
Figura 4.29 – Segundo zoom da frequência.....	110
Figura 4.30 – Apresentação de resultados.....	111
Figura 4.31 – Resultados numéricos da segunda análise.....	111
Figura 4.32 – Coeficientes de aproximação em 4 níveis de iteração do caso de estudo II.....	112
Figura 4.33 – Coeficientes de detalhamento em 4 níveis de iteração do caso de estudo II.....	113
Figura 4.34 – Momento da abertura da interligação do estudo de caso II.	114
Figura 4.35 – Momento da abertura da interligação do estudo de caso II – análise com diferença angular entre UNIR - UFSC.....	114
Figura 4.36 – Análise da oscilação durante a restauração do sistema.....	115
Figura 4.37 – Detecção dos estágios do ERAC do estudo de caso II.	115
Figura 4.38 – Primeiro estágio do ERAC do estudo de caso II.....	116
Figura 4.39 – Segundo estágio do ERAC do estudo de caso II.....	117
Figura 4.40 – Terceiro estágio do ERAC da segunda análise.	117
Figura 4.41 – Quarto estágio do ERAC da segunda análise.....	118
Figura A.1 – Relés Eletromecânicos.	A-3
Figura A.2 – Representação do relé de sobrefrequência e subfrequência.	A-5
Figura A.3 – Diagrama de blocos do Relé de Taxa de variação de Frequência.....	A-6
Figura B.1 – Matrizes atuacao_tempo e atuacao_freq.....	B-1

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Frequências e faixas de tempo do sinal exemplo.....	35
Tabela 4.1 – Características do SIN.....	78
Tabela 4.2 – Ajustes do ERAC para a região Sudeste.....	89
Tabela 4.3 – Ajustes do ERAC para a região Centro-Oeste.....	89
Tabela 4.4 – Ajustes do ERAC para a região Sul.....	89
Tabela 4.5 – Ajustes do ERAC para a região Acre-Rondônia.....	90
Tabela 4.6 – Ajustes do ERAC para a região Norte/Nordeste.....	90
Tabela 4.7 – Datas de Ocorrência de Ilhamentos Acre-Rondônia.....	91
Tabela 4.7 – Resultados obtidos da primeira análise.....	105
Tabela B.1 – Variáveis e funções utilizadas no pré-processamento.....	B-1
Tabela B.2 – Variáveis e funções utilizadas no Iniciar do Algoritmo.....	B-3
Tabela B.3 – Variáveis e funções utilizadas em Valores Teóricos.....	B-5
Tabela B.4 – Variáveis, vetores e matrizes utilizadas na TWD.....	B-6
Tabela B.5 – Variáveis e matrizes utilizadas na detecção e análise.....	B-7
Tabela B.6 – Função utilizada no Relatório de Resultados.....	B-7
Tabela I.1 – Metodologia do cálculo de Prony.....	I-4

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital;
AC-RO	Acre-Rondônia;
ANSI.....	<i>American National Standards Institute</i> ;
API	<i>Application Programming Interface</i> ;
CAG	Controle Automático de Geração;
CERTI.....	Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras;
CCC.....	<i>Capacitor Commutated Converter Back-to-Back</i> ;
CLP.....	Controlador Lógico Programável;
CO ₂	Dióxido de carbono;
COS.....	Centro de Operação do Sistema;
CNPq.....	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico;
CTEEP.....	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista;
CEPEL.....	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica;
COPPE/UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro;
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> ;
DP.....	Descargas Parciais;
ECE	Esquemas de Controle de Emergência;
ECG.....	Eletrocardiograma;
EIPP.....	<i>Eastern Interconnect Phasor Project</i> ;
EPE.....	Empresa de Pesquisa Energética;
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i> ;
ERAC	Esquema Regional de Alívio de Carga;
EUA.....	Estados Unidos da América;
FINEP.....	Agência Brasileira da Inovação;
GMT	<i>Greenwich Mean Time</i> ;
GPS.....	<i>Global Positioning System</i> ;
HWT.....	<i>Hard Wavelet Threshold</i> ;
IPDO.....	Informativo Preliminar Diário de Operação;

LabPlan.....	Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica;
LASC.....	Laboratório de Supervisão e Controle;
LapSe.....	Laboratório de Proteção do Sistema Elétrico;
LS.....	<i>Load Shedding</i> ;
LT.....	Linha de Transmissão;
MedFasee.....	Sistema de Medição Fasorial Sincronizada com Aplicações em Sistemas de Energia Elétrica;
NE.....	Nordeste;
ONS.....	Operador Nacional do Sistema;
OTBX.....	<i>Oscillation Tool Box</i> ;
PAC.....	Programa de Aceleração do Crescimento;
PCH.....	Pequena Central Hidrelétrica;
PET.....	Politereftalato de Etileno;
PMU.....	<i>Phasor Measurement Unit</i> ;
PDC.....	<i>Phasor Data Concentrator</i> ;
PLC.....	<i>Power Line Communication</i> ;
PLCC.....	<i>Power Line Carrier Communication</i> ;
PPS.....	Proteção para Perda de Sincronismo;
RDP.....	Registrador Digital de Perturbação;
ROCOF.....	<i>Rate of Change of Frequency</i> ;
RTDMS.....	<i>Real Time Dynamics Monitoring System</i> ;
SAC.....	Subsistema de Aquisição e Controle;
SAGE.....	Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia;
SAR.....	Subsistema de Análise de Redes;
SCADA.....	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> ;
SCE.....	<i>Southern California Edison</i> ;
SE/CO.....	Sudeste/Centro-Oeste;
SEB.....	Sistema Elétrico Brasileiro;
SEP.....	Sistema Elétrico de Potência;
SIG.....	Subsistema de Interface Gráfica;
SIN.....	Sistema Interligado Nacional;
SMFS.....	Sistema de Medição Fasorial Sincronizado;

SPDC.....	<i>State Power Dispatching Center;</i>
SPMS.....	<i>Synchronized Phasorial Measurement System;</i>
SSC.....	Subsistema de Suporte Computacional;
STFT.....	<i>Short Time Fourier Transform;</i>
STI.....	Subsistema de Tratamento de Informações;
SVG.....	<i>Scalable Vector Graphics;</i>
SWT.....	<i>Soft Wavelet Threshold;</i>
TC.....	Transformador de Corrente;
TERNA.....	Rete Elettrica Nazionale;
TDF.....	Transformada Discreta de Fourier;
TF.....	Transformada de Fourier;
TI.....	Tecnologia da Informação;
TP.....	Transformador de Potencial;
TDF.....	Transformada Discreta de Fourier;
TW.....	Transformada <i>Wavelet</i> ;
TWC.....	Transformada <i>Wavelet</i> Contínua;
TWD.....	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta;
UFAC.....	Universidade Federal do Acre;
UFAM.....	Universidade Federal do Amazonas;
UFBA.....	Universidade Federal da Bahia;
UFC.....	Universidade Federal do Ceará;
UFJF.....	Universidade Federal de Juiz de Fora;
UFGRS.....	Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
UFLS.....	<i>Under Frequency Load Shedding;</i>
UFMA.....	Universidade Federal do Maranhão;
UFMG.....	Universidade Federal de Minas Gerais;
UFSC.....	Universidade Federal de Santa Catarina;
UFPA.....	Universidade Federal do Pará;
UFPE.....	Universidade Federal do Pernambuco;
UFMS.....	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul;
UFMT.....	Universidade Federal do Mato Grosso;
UFT.....	Universidade Federal do Tocantins;
UnB.....	Universidade de Brasília;
UNIFAP.....	Universidade Federal do Amapá;

UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá;
UNIPAMPA	Universidade Federal dos Pampas;
UNIR.....	Universidade Federal de Rondônia;
UHE	Usina Hidrelétrica;
USP-SC.....	Universidade de São Paulo – Núcleo de São Carlos;
UTC	<i>Universal Time Coordinated;</i>
UTE.....	Usina Termelétrica;
UTFPR.....	Universidade Tecnológica Federal do Paraná;
UTR	Unidade Terminal Remoto;
VPN	<i>Virtual Private Network;</i>
WAMS.....	<i>Wide Area Measurement Systems;</i>
WAN.....	<i>Wide Area Network;</i>
WECC.....	<i>Western Electric Coordinating Council;</i>
WDFT	<i>Windowed Discrete Fourier Transform.</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	<i>Motivações.....</i>	2
1.2	<i>Objetivos.....</i>	3
1.3	<i>Objetivos Específicos.....</i>	4
1.4	<i>Estrutura do trabalho</i>	4
2	SISTEMAS E CONCEITOS	7
2.1	<i>Introdução.....</i>	7
2.2	<i>Sistema de supervisão SCADA.....</i>	8
2.2.1	<i>Sistemas SCADA.....</i>	11
2.3	<i>Sistema de Medição Fasorial Sincronizada.....</i>	14
2.4	<i>Detecção de Eventos no Sistema Elétrico</i>	16
2.5	<i>Wavelets.....</i>	17
2.5.1	<i>O que é uma wavelet?.....</i>	18
2.5.2	<i>Aplicações da Transformada Wavelet em sistemas de potência</i>	20
2.5.3	<i>Descrição matemática</i>	23
2.5.4	<i>Funções wavelets mais conhecidas.....</i>	24
2.5.5	<i>Transformada Wavelet Contínua</i>	29
2.5.6	<i>Transformada Wavelet Discreta.....</i>	33
2.6	<i>Hard Wavelet Threshold (HWT).....</i>	38
2.7	<i>Soft Wavelet Threshold (SWT).....</i>	40
2.8	<i>Considerações.....</i>	41
3	DESENVOLVIMENTOS E METODOLOGIA PROPOSTA	43
3.1	<i>Introdução.....</i>	43
3.2	<i>Ilhamento.....</i>	43
3.2.1	<i>Técnicas remotas de detecção de ilhamento.....</i>	49
3.2.2	<i>Técnicas locais de detecção de ilhamento</i>	50
3.3	<i>Metodologia Proposta</i>	52
3.3.1	<i>Abertura de Interligação</i>	58
3.3.2	<i>Atuação do Esquema de Rejeição de Carga</i>	59
3.3.3	<i>Restabelecimento da Interligação.....</i>	60
3.3.4	<i>DFAM.....</i>	62
3.3.5	<i>Implementação computacional associada à metodologia</i>	66

4	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	75
4.1	<i>Introdução.....</i>	75
4.2	<i>Sistema Interligado Nacional.....</i>	75
4.2.1	<i>Sistema Acre-Rondônia</i>	79
4.3	<i>Projeto MedFasee-BT.....</i>	83
4.4	<i>Esquema de Alívio de Carga.....</i>	86
4.4.1	<i>Classificações dos Esquemas de Alívio de Carga</i>	87
4.4.2	<i>Esquema de Alívio de Carga no Brasil.....</i>	89
4.5	<i>Padronizações Utilizadas</i>	91
4.5.1	<i>Wavelet Utilizada.....</i>	91
4.5.2	<i>Parâmetro da HWT.....</i>	92
4.5.3	<i>Padronização de Símbolos e Cores.....</i>	92
4.5.4	<i>Padronização de Horários.....</i>	95
4.6	<i>Caso de Estudo I – Ocorrência de 12/06/2011.....</i>	95
4.6.1	<i>Descrição da Ocorrência.....</i>	95
4.6.2	<i>Aplicação da Metodologia à Ocorrência.....</i>	99
4.6.3	<i>Resumo da primeira análise</i>	105
4.7	<i>Caso de Estudo II – Ocorrência de 27/05/2011.....</i>	106
4.7.1	<i>Descrição da Ocorrência.....</i>	106
4.7.2	<i>Aplicação da Metodologia na Ocorrência.....</i>	110
5	CONCLUSÕES.....	119
5.1	<i>Contribuições.....</i>	121
5.2	<i>Sugestões para trabalhos futuros</i>	122
	REFERÊNCIAS.....	125
	APÊNDICE A – FREQUÊNCIA DO SISTEMA ELÉTRICO	A-1
A.1	<i>Introdução</i>	A-1
A.2	<i>Relés de Proteção</i>	A-2
A.3	<i>Relé de Sobrefrequência e Subfrequência</i>	A-4
A.4	<i>Relé de Taxa de Variação de Frequência.....</i>	A-5
	APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DO CÓDIGO IMPLEMENTADO.....	B-1
B.1	<i>Introdução</i>	B-1
B.2	<i>Pré-Processamento.....</i>	B-1
B.2.1	<i>Inicializando.....</i>	B-3
B.2.2	<i>Valores teóricos.....</i>	B-4
B.2.3	<i>Transformada Wavelet Discreta.....</i>	B-5

B.2.4 - Detecção e análise.....	B-6
B.2.5 - Relatórios de Resultados.....	B-7
ANEXO I – MÉTODO DE PRONY	I-1
ANEXO II - COEFICIENTES DAUBECHIES.....	II-1

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) vem aumentando em complexidade e num ritmo acelerado. Além disso, o SEP está sujeito a faltas e outros eventos que prejudicam o fornecimento de energia e que trazem consequências maléficas aos equipamentos conectados.

Com a crescente expansão das interligações nos sistemas elétricos para aumentar a sua robustez minimizando os riscos, as redes de transmissão são, muitas vezes, exploradas no limite de suas capacidades e operadas sob um grande número de restrições de operação. Para contornar algumas dessas dificuldades, é necessário que sejam modernizados os sistemas elétricos existentes, assim como seus sistemas de monitoramento, operação e proteção, a fim de minimizar a duração, a proporção e a quantidade de ocorrências (BRUNO *et al*, 2006).

Uma das possíveis ocorrências é o ilhaento, onde uma região fica eletricamente isolada das demais, sendo abastecida unicamente pelas fontes geradoras que estão dentro desta região e que pode ser insuficiente para atender à demanda nesta nova configuração. Nesses casos pode ocorrer a diminuição da frequência do sistema, levando à atuação de proteções que são responsáveis por rejeitar (desligar) um montante de carga pré-estabelecido para tentar manter o sistema com valores nominais.

Para monitorar, operar e proteger o SEP de eventuais ocorrências, um sistema de monitoramento amplamente utilizado é o SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Entretanto, novas tecnologias já estão disponíveis, como o Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS), que é capaz de medir sinais elétricos (tensão e corrente) diretamente sob a forma de fasor e fornecer também dados do sistema a uma taxa muito mais elevada se comparado ao SCADA.

Com a elevada quantidade de dados, são necessárias técnicas e ferramentas matemáticas que auxiliem no entendimento do comportamento do sistema, aumentando a eficiência e reduzindo o tempo gasto na análise desses dados. Uma ferramenta promissora é a Transformada *Wavelet* (TW), que possui como característica de destaque sua capacidade de decompor os sinais analisados no domínio do tempo e frequência, sendo capaz de realizar apontamentos temporais de eventos, facilitando e melhorando a análise de ocorrências.

1.1 Motivações

A expansão do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), não só em termos de capacidade instalada, mas também em termos da malha de transmissão, fez com que fossem alcançados territórios que antes operavam de forma isolada (GOMES *et al*, 2012). Essa maior interligação entre subsistemas traz diversos benefícios para os consumidores conectados às redes mais fracas, tais como maior confiabilidade e melhor qualidade do fornecimento da energia elétrica. Entretanto, para o SEB isso representa um desafio, pois torna a sua operação mais complexa.

A recente interligação do Sistema Interligado Nacional (SIN) com os estados de Rondônia e do Acre, representando a interligação Acre-Rondônia (AC-RO), trouxe grandes desafios tanto na monitoração, quanto na proteção e operação dessa interligação. No primeiro ano da interligação ocorreram muitos casos de ilhamento e, em muitos desses casos houve rejeição de carga, tornando estes casos numa oportunidade ímpar de estudar a eficácia dos esquemas de alívio de carga, assim como o comportamento das grandezas elétricas frente a eventos de ilhamento.

Para elevar os níveis de confiabilidade e segurança são necessárias medidas preventivas, tais como um bom monitoramento do sistema. O Sistema de Medição Fasorial

Sincronizada é capaz de realizar medidas elétricas de tensão e corrente do sistema diretamente sob a forma de fasor e numa taxa de até 60 fasores por segundo, associando-as a uma estampa de tempo. Desta forma, independente da distância entre os pontos de medição, tem-se a certeza de que todas foram efetuadas simultaneamente. O avanço do SMFS e das tecnologias a ele associadas pode trazer um ganho significativo para se conhecer o comportamento do sistema monitorado. Este paradigma permite inserir novas soluções para monitorar, controlar, supervisionar e proteger o sistema de potência.

Outra possibilidade favorecida pelo SMFS é armazenar os dados de medição para utilizá-los nos chamados estudos de pós-operação. Para analisar os dados da medição fasorial sincronizada a Transformada *Wavelet* é uma ferramenta com grande potencial, uma vez que os resultados obtidos através da sua aplicação facilitam a detecção de eventos no sistema elétrico.

1.2 Objetivos

Este trabalho objetiva desenvolver, utilizando automação computacional, uma metodologia para detecção, análise e geração de relatórios de eventos relacionados a ilhamentos. Nas análises são empregados dados provenientes de sistemas de medição fasorial sincronizada.

Como ferramenta matemática para análise dos dados fasoriais é utilizada a Transformada *Wavelet* Discreta para apontar pontualmente os instantes de tempo dos eventos analisados. A implementação da metodologia proposta utiliza a plataforma Matlab® como base, que possui facilidades para desenvolvimento de protótipos, de interface gráfica e geração de relatórios.

1.3 Objetivos Específicos

- Os dados fasoriais utilizados são provenientes do projeto MedFasee-BT (DECKER *et al*, 2006), que dispõe de fasores reais do Sistema Elétrico Brasileiro, amostrados numa taxa de 60 fasores por segundo.
- O sistema elétrico analisado é o Sistema Interligado Nacional (SIN), dando ênfase ao subsistema Acre-Rondônia/SIN.
- Através de análises *off-line*, são explorados os seguintes eventos:
 - a) Perda de interligação;
 - b) Atuação de cada estágio do alívio de carga;
 - c) Restabelecimento da interligação.

1.4 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta os principais conceitos e sistemas de monitoramento envolvidos neste trabalho. São descritos os sistemas de monitoramento SCADA e o Sistema de Medição Fasorial Sincronizado – SMFS, seguindo por métodos de detecção de eventos no sistema elétrico de potência, dentre os quais se destaca a transformada *wavelet*. Neste mesmo capítulo é feita uma descrição dos principais conceitos relacionados à transformada *wavelet*, além dos métodos de *triggering* “*Hard Wavelet Thresholding*” e “*Soft Wavelet Thresholding*”.

O Capítulo 3 aborda a metodologia desenvolvida. Primeiramente descreve-se o evento de ilhamento, apresentando características e as técnicas empregadas para sua detecção, para posteriormente descrever a metodologia proposta, que faz uso da transformada *wavelet* discreta e de dados do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada para a

detecção e localização gráfica de eventos envolvendo perda e restabelecimento de interligação e atuação do alívio de carga. Apresenta-se então a implementação computacional desenvolvida para avaliar essa metodologia.

No Capítulo 4 descreve-se o Sistema Interligado Nacional (SIN), apresentando suas características e detalhando particularidades do subsistema Acre-Rondônia, interligado ao SIN desde o ano de 2009. Após, apresenta-se o esquema de alívio de carga, descrevendo os tipos de classificação para depois descrever o sistema existente no Brasil, o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC), detalhando os valores de ajustes de cada estágio. Detalhado o ERAC, descreve-se o projeto MedFasee-BT, apresentando um histórico e as características atuais para o fornecimento de dados fasoriais que são utilizados nesse trabalho. Então aplica-se a metodologia proposta para analisar duas ocorrências na interligação Acre-Rondônia/SIN para comprovação da eficiência da metodologia.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas e propostas para dar continuidade a este trabalho.

2 SISTEMAS E CONCEITOS

2.1 Introdução

A medição de grandezas elétricas é importante para avaliar o atual estado do sistema elétrico de potência, pois permite o acompanhamento da operação do sistema e atendimento a restrições como limite de carregamento em equipamentos. Além disso, combinada com o registro de eventos envolvendo atuações da proteção, permite análise posterior das ocorrências. Para isso existem robustos sistemas para monitorar e controlar o sistema, com destaque para o sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition System*).

Neste capítulo são descritos os principais equipamentos e as funções de um sistema SCADA e em seguida é descrita a recente tecnologia de medição fasorial sincronizada, seus principais equipamentos e facilidades proporcionadas pela sua aplicação. Os dados disponibilizados por estes sistemas de monitoramento permitem uma série de aplicações, tais como a detecção e diagnóstico de eventos.

Duas das funções dos sistemas SCADA e da medição fasorial sincronizada, a detecção e diagnóstico de eventos no sistema elétrico, também são discutidas nesse capítulo, assim como algumas metodologias utilizadas para esse fim. Dentre as técnicas de processamento de sinais utilizadas para detectar eventos no sistema, destaca-se a transformada *wavelet*, que pode ser utilizada em conjunto com uma ferramenta de *triggering* para detectar e apontar eventos.

Por fim, é descrita uma técnica de *triggering* associada às *wavelets*, o *Hard Wavelet Thresholding*, e seu uso para filtragem de sinais do sistema elétrico.

2.2 Sistema de supervisão SCADA

O sistema SCADA é um acrônimo do inglês *Supervisory Control And Data Acquisition System* (Sistema Supervisório de Controle e Aquisição de Dados). Esse sistema engloba o recolhimento de informações (dados analógicos e digitais), transferência para a central de análise, operação remota através de uma rede de telecomunicação e a apresentação das informações em uma série de telas para o operador (MOURA, 2012). No centro de operação esses dados são utilizados por diversos algoritmos computacionais, dentre eles a estimação de estados, análise de contingências, etc. (GAUSHELL *et al*, 1987).

O SCADA permite monitorar e controlar vários processos através da comunicação entre a estação remota e o centro de controle. Os principais componentes encontrados em qualquer sistema SCADA são apresentados na Figura 2.1 (ROCKWELL, 2011).

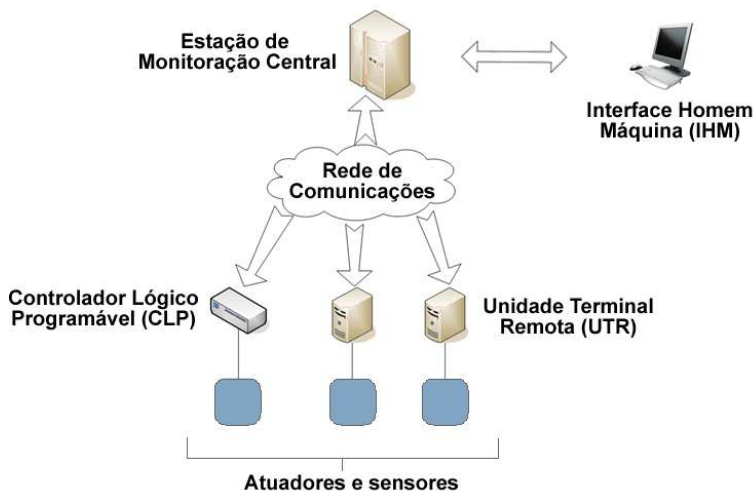


Figura 2.1 – Componentes de um sistema SCADA.

Os primeiros sistemas SCADA eram basicamente telemétricos e informavam, periodicamente, o estado do processo monitorado, enviando sinais das medidas e estados dos dispositivos através de um painel de lâmpadas e indicadores, sendo apenas uma interface informativa para o operador (SILVA *et al.*, 2005).

Um sistema supervisor SCADA traz muitos benefícios, inclusive financeiro, uma vez que elimina ou reduz drasticamente a necessidade de painéis de medição e comando, reduzindo a necessidade de compra de instrumentos e também do espaço físico necessário nas salas de comando. Além disso, proporciona facilidades para a geração de relatórios simples ou detalhados, praticidade de operação, entre outras vantagens.

Alguns dos principais componentes de um sistema SCADA são:

a) Interface Homem Máquina

A interface homem máquina (IHM) normalmente está associada à uma interface gráfica, que apresenta de forma visual a informação necessária ou desejada pelo operador. Incluem-se nesse escopo *displays*, leds, telas, painéis, monitores e também algum tipo de teclado para navegação, do tipo normal, de membrana ou *touch* (toque). A interface normalmente está ligada à base de dados do SCADA e também aos *softwares* a ele associados, provendo ao operador a capacidade de gerir todo processo.

A Figura 2.2 apresenta alguns exemplos de IHM. A Figura 2.2 (a) mostra um exemplo da fabricante WEG. Um exemplo da fabricante Delta é mostrado na Figura 2.2 (b). A Figura 2.2 (c) utiliza para a interface IHM uma controladora da família PIC e a Figura 2.2 (d) é um exemplo da fabricante Siemens.

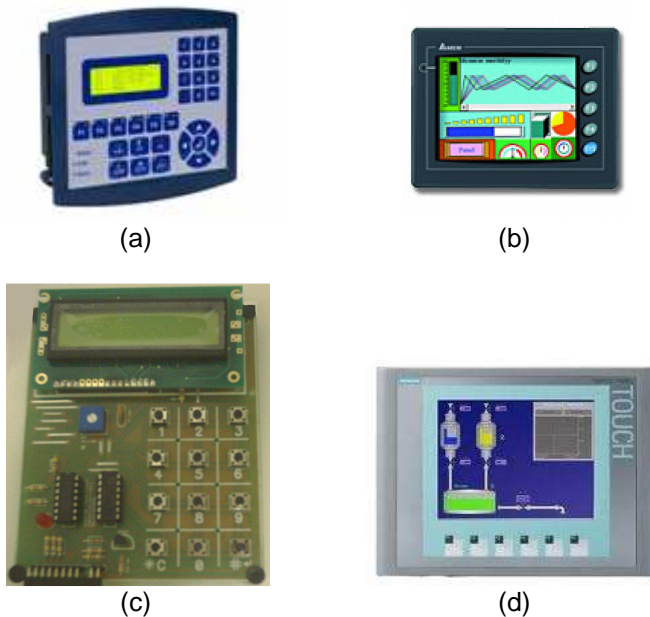


Figura 2.2 – Exemplos de Interface Homem Máquina

b) Unidades Terminais Remotas e Controlador Lógico Programável

A Unidade Terminal Remota (UTR) se conecta ao equipamento físico monitorado. Numa operação normal, a UTR é responsável por converter sinais elétricos do equipamento para valores digitais (tais como o estado de aberto ou fechado de um interruptor ou válvula de pressão, vazão, tensão ou corrente).

O Controlador Lógico Programável (CLP) possui as mesmas características de uma UTR. A diferença entre ambos está no fato do CLP possuir maior flexibilidade na linguagem de programação e controle dos sinais de entrada e saída, enquanto que as UTRs possuem uma arquitetura mais distribuída entre sua unidade de processamento central e os cartões de entrada e saída, tendo maior precisão nas sequências de eventos (SILVA, 2005).

Uma vez descritos alguns dos principais componentes, os parágrafos seguintes abordam alguns dos sistemas SCADA mais conhecidos.

2.2.1 Sistemas SCADA

a) SAGE

Desenvolvido no Laboratório de Supervisão e controle (LASC) do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL), o Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia (SAGE) é um sistema que tem como objetivo realizar funções típicas de um sistema SCADA de gerenciamento de energia nos sistemas elétricos de potência. O SAGE foi concebido para diversas aplicações e é suportado por arquiteturas de baixo custo (como os computadores pessoais – PCs), sendo utilizado principalmente nos Centros de Operação de Sistemas (COSs). Além disso, foi desenvolvido também para realizar a integração da base de dados do sistema eletroenergético com a rede de gestão corporativa da empresa (SILVA *et al*, 1998).

O SAGE contém soluções voltadas à supervisão e controle de um sistema elétrico em tempo real, constituindo-se num centro de aquisição e tratamento da informação. Concebido dentro da filosofia de sistemas abertos (AZEVEDO *et al*, 1999), esse sistema é compatível com o uso de padrões internacionais e industriais, utiliza protocolos de comunicação e dispositivos de interface padronizados, interface gráfica do usuário que inclui recursos de janela, zoom, tendências e utiliza linguagens de programação de alto nível, disponibilizando-o para diversas plataformas computacionais (CEPEL, 2013).

O SAGE é composto basicamente por dois grandes sistemas: o sistema básico e o sistema de aplicação (PEREIRA *et al*, 1995).

O sistema básico é dividido em subsistemas, a saber:

- Subsistema de Tratamento de Informações (STI), que tem por objetivo tratar as informações para o Banco de Dados;
- Subsistema de Suporte Computacional (SSC), responsável por gerenciar a base de dados em tempo real e gerenciar a configuração do SAGE em tempo real;
- Subsistema de Interface Gráfica (SIG), que possibilita a comunicação entre o SAGE e o operador, através da IHM;
- Subsistema de Aquisição e Comunicação (SAC), que realiza a aquisição, trata e distribui os dados pelo sistema supervisionado e controlado pelo SAGE.

O sistema de aplicação também é dividido em subsistemas, em especial o Subsistema de Análise de Redes (SAR), que fornece ao operador uma estimativa do estado do sistema, informando ocorrências de condições anômalas (condições não desejáveis), possibilitando ao operador tratar o sistema para retornar ao ponto de operação normal.

b) Mango

Desenvolvido no Canadá, é considerado um dos mais populares do mundo com código aberto. Tem capacidade de comunicação através de diversos protocolos, conta com funcionalidades de registro e alarmes.

O Mango é totalmente baseado em tecnologias *web* e suas interfaces são executadas no navegador da internet, sendo possível visualizar e controlar equipamentos remotamente através de um *smartphone*, por exemplo. Esse *software* pode ser encontrado no *website* oficial do Mango, no endereço eletrônico <http://mango.serotoninsoftware.com/>.

c) ScadaBR

O ScadaBR é um projeto desenvolvido na Fundação CERTI (Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras) e iniciou através de uma parceria com empresas de Florianópolis/SC.

O ScadaBR contém todas as funcionalidades do projeto Mango traduzidas para o Português, além da inclusão de uma API (*Application Programming Interface* ou Interface de Programação de Aplicativos) *web-services*, que é um componente que torna possível estender o SCADA em qualquer linguagem de programação, como os mais populares Java, C/C++, C#/VB.net, python, PHP, etc (ROCHA, 2013).

O ScadaBR também inclui os protocolos do setor elétrico (DNP3 e IEC101), além de um novo construtor de telas baseado em *Flex (flash)*, um novo sistema de *scripts*, *help* e manual para usuários, entre outras facilidades.

d) Beremiz

O projeto Beremiz conta com contribuições da França e de Portugal. Além de possuir as funcionalidades de um SCADA, também funciona como um CLP, podendo ser programado em linguagens padronizadas de automação como a lógica *Ladder*, por exemplo. Também chama atenção no Beremiz sua interface baseada em Vetores de Gráficos Escalares (SVG – do inglês *Scalable Vector Graphics*), que permite fazer animações a partir de desenhos vetoriais (ROCHA, 2013).

Embora sejam muito eficientes, os dados dos sistemas supervisórios mencionados, quando utilizados em um SEP, não são coletados diretamente sob a forma de fasores. Ou seja, os valores de ângulos necessitam ser estimados através de técnicas de estimação de estados. A recente tecnologia de medição fasorial sincronizada no tempo representa uma solução para

esse problema, além de trazer outros muitos benefícios para o estudo e operação do sistema elétrico.

2.3 Sistema de Medição Fasorial Sincronizada

Um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS, ou do inglês SPMS - *Synchronized Phasor Measurement System*) é um sistema capaz de realizar medições de grandezas elétricas em diferentes regiões geográficas de modo simultâneo.

Para que seja possível efetuar medições simultâneas, é utilizado um sistema de sincronização que permite que todas as medidas possuam a mesma referência de tempo. Um sistema de medição fasorial sincronizada é apresentado na Figura 2.3, contendo os principais equipamentos a ele associados.

Os elementos principais de um SMFS são os sistemas de sincronização, a Unidade de Medição Fasorial (chamada comumente de PMU - *Phasor Measurement Unit*), o Concentrador de Dados Fasoriais (chamado PDC - *Phasor Data Concentrator*), além dos canais de comunicação.

As PMUs são conectadas nos secundários dos Transformadores de Corrente (TCs) e dos Transformadores de Potencial (TPs) para monitorar os sinais analógicos de corrente e tensão. A Figura 2.4, adaptada de Ehrensperger (2004), apresenta a estrutura básica de uma PMU. As medições elétricas que são realizadas pelas PMUs geralmente são enviadas para um concentrador de dados numa taxa de 10 a 60 fasores por segundo (fps ou fasores/s) (IEEE, 2011).

Através do Sistema de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning System*), a PMU insere no empacotamento (*frame* de dados) do fasor gerado (calculado) uma etiqueta de tempo e então envia esse *frame* para o PDC através de um canal de comunicação.

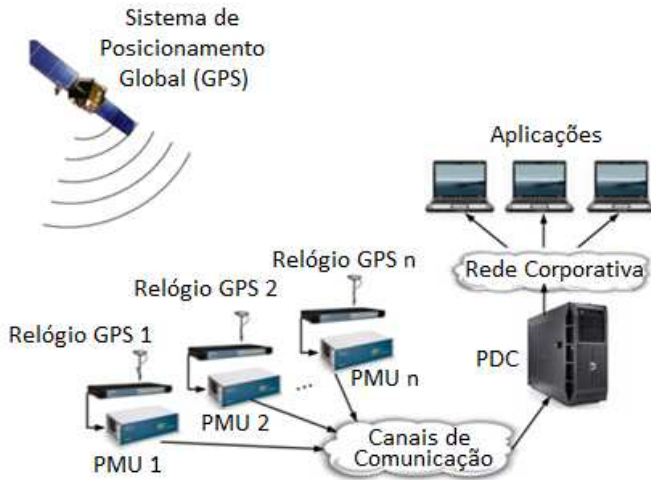


Figura 2.3 – Exemplo de SMFS

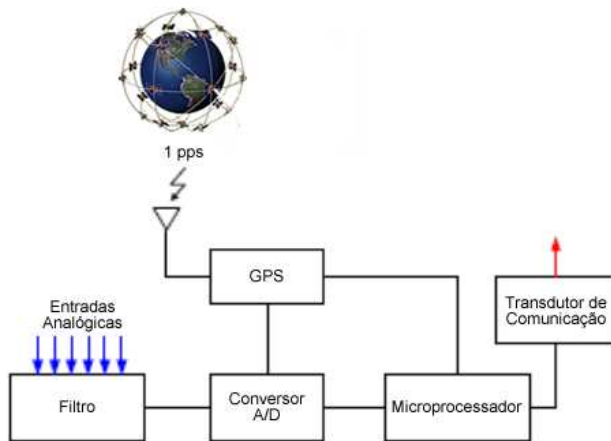


Figura 2.4 – Estrutura básica de uma PMU.

A comunicação da PMU com o PDC segue o padrão de formatação de dados descrito na seção 5.4.1 da norma IEEE C37.118.1 (IEEE, 2011), que estabelece diferentes tipos de formato de mensagens e permite vários canais de comunicação.

Cada tipo de formato tem características específicas tanto para configuração do SMFS quanto para transferência de dados. A padronização possui como grande vantagem permitir que diferentes equipamentos de diferentes fabricantes possam interagir entre si.

A comunicação física entre uma PMU e o PDC pode ser feita através de um sistema de comunicação aberta (como a internet), ou fechada (corporativa), via fibra óptica, condutores metálicos, rádio, *wireless*, enfim, há uma ampla variação de possibilidades para realizar a comunicação entre a PMU e o PDC.

Diversas soluções podem ser empregadas, embora algumas sejam inviáveis financeiramente. Dentre algumas soluções possíveis, encontram-se redes cabeadas (como linhas telefônicas e PLC – *Power Line Communication*) e transmissões sem fio como enlaces de micro-ondas (BEGOVIC *et al*, 2008).

Além da função de concentrador de dados, o PDC pode também fornecer os dados, quando requisitados, em tempo real para plataformas de monitoramento e controle do sistema ou em tempo *off-line* para a realização de estudos (DECKER *et al*, 2004).

Através das informações fornecidas pelas PMUs, é possível visualizar o comportamento dinâmico do sistema e utilizando técnicas de processamento de sinais nos dados da medição fasorial sincronizada, consegue-se realizar a detecção de eventos no SEP.

2.4 Detecção de Eventos no Sistema Elétrico

Perturbações como curtos-circuitos e operações de chaveamento em equipamentos causam alterações nas grandezas elétricas e em alguns casos desligamentos. Pequenas perturbações, como mudanças de *taps* de transformadores e manobras de compensadores reativos, afetam o sistema

localmente, causando alterações nos respectivos gráficos de tensão. Entretanto, grandes perturbações, que alteram as condições de operação de geradores e causam consideráveis desequilíbrios entre carga e geração, afetam várias áreas dos SEPs e são melhor observadas em gráficos de frequência e defasagem angular (ZIMMER *et al*, 2012). Perturbações de grande porte geralmente são causadas por faltas que desencadeiam uma série de atuações de sistemas de proteção acarretando numa divisão de sistemas interligados. (REE *et al*, 2005).

Ferramentas automáticas para diagnóstico de ocorrências normalmente baseiam-se nas alterações que ocorrem em grandezas como correntes, tensões ou frequência. Em alguns casos, grandezas obtidas indiretamente, como potência ou impedância, também podem ser empregadas com este objetivo. Essas ferramentas podem ser utilizadas *online* ou em análises *post-mortem*. As fontes de informações também variam, podendo ser registros coletados de Registradores Digitais de Perturbações (RDPs), oscilografias fornecidas por relés digitais ou sincrofasores do SMFS. Essas informações podem ainda serem combinadas com dados provenientes das sequências de eventos dos sistemas SCADA.

Para se trabalhar com a detecção de oscilação através da medição fasorial, Pan *et al* (2012) utilizam o método baseado em *wavelets* para analisar múltiplos sinais e detectar os modos de oscilação presentes nos sinais, bem como as suas formas modais (*mode-shapes*), que levam em consideração a amplitude e fase dos sinais, esboçado em gráficos polares. Esse trabalho apresenta os conceitos fundamentais da Transformada *Wavelet*, destacando sua capacidade em detecção de eventos no sistema analisado, neste caso o sistema elétrico.

2.5 WAVELETS

Alguns autores sugerem a tradução de *wavelets* para o idioma português, como *ondaletas* (Morettin,1999) ou

ondeletas (Bolzan, 2006). Entretanto, na grande maioria dos trabalhos é utilizada a expressão em inglês *wavelets*. Preferiu-se então manter a expressão *wavelets* neste trabalho.

2.5.1 O que é uma *wavelet*?

As wavelets são um produto da colaboração de várias áreas, desde a matemática e física puras, até engenharia e processamento de sinais. Várias pesquisas independentes nessas áreas buscavam objetivos semelhantes, apesar de utilizarem abordagens diferentes, buscavam novas formas de representar sinais no domínio tempo-frequência. As diversas linhas de pesquisa convergiram para um ponto no final da década de 80, sendo então formalizada a teoria de wavelets. A unificação de todos os pensamentos tornou-se um fator primordial para a subsequente popularidade das wavelets, impulsionando assim novas pesquisas na área (ARAÚJO, 2007).

As *wavelets* são funções capazes de decompor outras funções no domínio da frequência (em diferentes escalas de tempo), de tal modo que seja possível analisá-las nessas diferentes escalas de tempo e também de frequência. A teoria *wavelet* fornece um quadro de unificação para diferentes e numerosas técnicas de processamento de sinais que foram desenvolvidos de forma independente (RIOUL *et al*, 1991). Uma técnica em particular desperta o interesse na análise de sinais não estacionários, que é a Transformada *Wavelet* (TW), técnica que é vista como uma alternativa ao método clássico da Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT - *Short Time Fourier Transform*). A Transformada *Wavelet* (no domínio contínuo e discreto no tempo) será explorada nos itens 2.5.5 e 2.5.6.

O termo (expressão) *wavelet* é recente, sendo proposto pela primeira vez no ano de 1981. Entretanto, o seu desenvolvimento ocorreu no início do século XX. Desde então, os estudos sobre as utilizações, funcionalidades e vantagens das *wavelets* não cessaram. A Figura 2.5 apresenta um resumo temporal no desenvolvimento da *wavelet*.

A primeira publicação que relata a transformada *wavelet* foi a tese de doutorado escrita por Alfred Haar no ano de 1909 (HAAR, 1909). Mas somente no ano de 1981 é que o termo *wavelet* foi proposto pelo geofísico Jean Morlet.

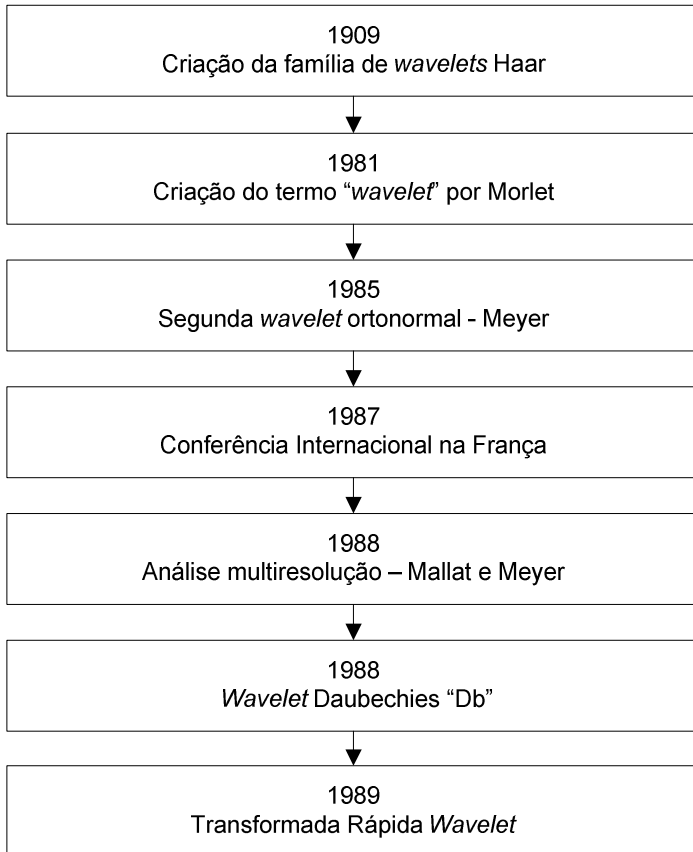


Figura 2.5 – Resumo cronológico da *Wavelet*.

A segunda *wavelet* foi criada por Yves Meyer, denominada *wavelet* Meyer em 1985. Em 1987, diversas *wavelets* e aplicações foram apresentadas numa conferência internacional ocorrida na França. (CHUN-LI, 2010).

2.5.2 Aplicações da Transformada *Wavelet* em sistemas de potência

Segundo Fernández et al. (2002), o primeiro uso da transformada *wavelet* em sistemas de potência foi feito no ano de 1994. A partir de então, o número de publicações em que se utiliza transformada *wavelet* na solução de problemas em SEPs vem aumentando.

Kim e Aggarwal (2000) apresentaram um estudo mostrando como a transformada *wavelet* estava sendo usada até então no SEE. A

Figura 2.6, adaptada de Kim e Aggarwal (2000), mostra que até aquele ano os maiores esforços eram concentrados na qualidade de energia e que também havia um grande percentual de proposta de utilização da transformada *wavelet* na proteção de SEPs.

A Qualidade de Energia Elétrica (QEE) possui cada vez mais importância nos estudos tanto de fornecimento quanto de consumo. Toledo *et al.* (2007) desenvolveram um programa baseado na transformada *wavelet* discreta para classificação de alguns problemas da qualidade de energia elétrica, tais como, afundamentos e elevações de tensão e chaveamento de capacitores (TOLEDO *et al.*, 2007).

Há uma grande quantidade de publicações encontradas em revistas especializadas, conferências, dissertações e teses de doutorado na área da proteção de sistemas de potência. Esses trabalhos propõem diferentes metodologias para a resolução de problemas encontrados nos esquemas de proteção tradicionais. Araújo *et al.* (2011) comparam o desempenho de um algoritmo de localização de faltas utilizando diversas famílias *wavelets* e diferentes ordens das famílias analisadas. A metodologia utilizada no trabalho serviu para o estudo de fenômenos transitórios no SEP e a ferramenta desenvolvida foi baseada no ambiente MATLAB para auxiliar alunos do curso de Engenharia Elétrica em disciplinas como proteção de sistemas de potência (ARAÚJO *et al.*, 2011).

Oliveira (2009) apresenta um algoritmo de proteção diferencial de transformadores de potência baseado na análise *wavelet*. O projeto consiste em dois blocos principais, onde o bloco 1 se caracteriza pela detecção do distúrbio e o bloco 2 pela discriminação do distúrbio, apresentando numa interface gráfica os resultados obtidos no algoritmo desenvolvido (OLIVEIRA, 2009).

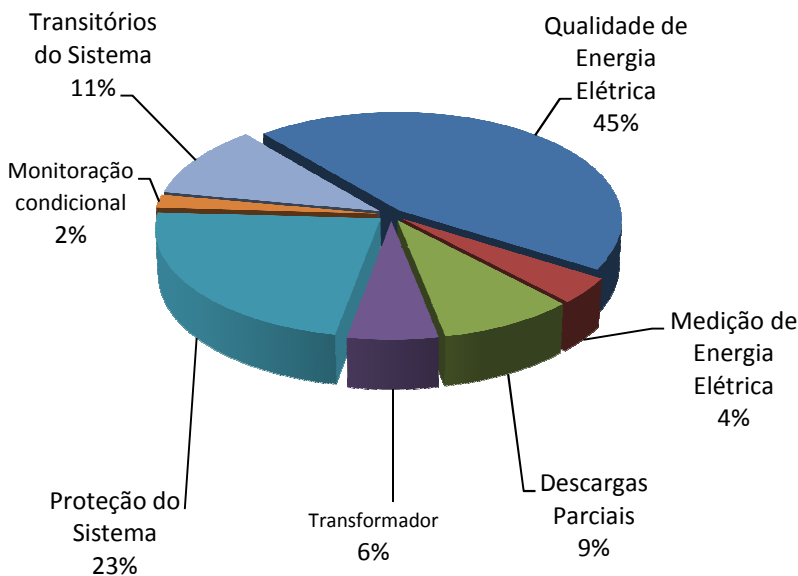


Figura 2.6 – Aplicação da Transformada *Wavelet* em Sistemas de Energia Elétrica.

Fenômenos causados por corrente de magnetização de transformadores, descargas atmosféricas, chaveamentos, etc, são chamados transitórios. A análise de transitórios eletromagnéticos através do uso de *wavelets* vem sendo utilizada em diversos estudos. Zheng *et al.* (1999) mostram os modelos dos componentes do sistema no domínio *wavelet*, onde esses modelos podem ser utilizados por quaisquer tipos de transformada *wavelet*. O esquema apresentado é adequado para

transientes e harmônicas variantes no tempo e a modelagem foi validada através de um sistema real de uma fornalha (Zheng, *et al.*, 1999). Dantas *et al.* (2002) procuraram desenvolver uma rotina de construção de equações de estados de sistemas elétricos analisando desempenhos computacionais e utilizando em conjunto a *wavelet* de Haar. Com este desenvolvimento, foi complementado e melhorado o trabalho iniciado por Brito *et al.* (2001), que aplicou *wavelet* no estudo de sistemas de potência, mas restringido a sistemas de pequeno porte.

Um método importante para avaliar as condições de operação de equipamentos de alta tensão é o ensaio de Descargas Parciais (DP). Os métodos comuns de monitoramento de DP são as observações elétrica e química dos equipamentos. Entretanto, esses métodos não são processados em tempo real, o que permitiria um melhor planejamento da manutenção preventiva ou corretiva do equipamento. Lima *et al.* (2009) utilizam a transformada *wavelet* para a análise de sinais provenientes de sensores acústicos para detectar DP descrito por Lundgaard (1992). Já Costa *et al.* (2002) estudaram a viabilidade da utilização da transformada *wavelet* discreta como ferramenta para classificar as descargas parciais de origem desconhecida, sendo a transformada utilizada para buscar padrões nos sinais das DP.

Em um artigo, Magnago e Abur (1998) utilizam a transformada *wavelet* com a finalidade de detectar o ponto de falha do sistema analisando os transientes de alimentação (tensão e corrente). São utilizados os dados de monitoração do relé conectado na linha e, através da teoria das ondas viajantes e utilizando as componentes de alta frequência obtidas com a transformada *wavelet*, é feita uma associação com o tempo de viagem dos transientes ao longo da linha monitorada, ou seja, a distância entre o ponto de falha e do relé (MAGNAGO *et al.*, 1998).

Lin *et al.* (2001) descrevem uma metodologia baseada na transformada *wavelet* contínua para estimar a frequência do

sinal do sistema de potência. A frequência do sistema é uma importante variável para diagnosticar a qualidade da energia. O algoritmo proposto é robusto o suficiente para trabalhar sob condições dinâmicas, sendo imune aos efeitos de harmônicas e componentes contínuas (LIN *et al*, 2001).

No ano de 2008, Megahed *et al.* descreveram uma estratégia para escolher uma *wavelet* que fosse adequada para análise de transientes do sistema de potência. Muitas *wavelets* têm sido utilizadas para esta análise, como Haar, Daubechies, Symlets, Coiflets, etc e escolher ou até mesmo desenvolver uma *wavelet* é um fator importante para a aplicação empregada (MEGAHED *et al*, 2008).

Recentemente, Ren e Kezunovic (2011) propuseram um algoritmo capaz de estimar os parâmetros fasoriais em um quarto de ciclo do sinal monitorado, ou seja, possuindo rápida resposta e também com alta precisão, mesmo com uma vasta gama de desvios de frequência (REN *et al*, 2011).

2.5.3 Descrição matemática

Uma função *wavelet* é denotada por $\psi(t)$ e possui as seguintes características, descritas nas equações (2.1), (2.2) e (2.3) (PINTO, 2005):

- Área nula sob a curva:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2.1)$$

- Energia finita:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt = \text{constante} \quad (2.2)$$

- A função deve tender a zero no infinito (tanto positivo como negativo):

$$\lim_{t \rightarrow \pm\infty} \psi(t) = 0 \quad (2.3)$$

Existem diversas funções que atendem estes requisitos e que podem ser chamadas *wavelets*. Atualmente, diversas áreas estão utilizando a transformada *wavelet* no lugar da transformada de Fourier. Essa mudança de paradigma está sendo aplicada, por exemplo, em geofísica, astrofísica, processamento de imagens, eletrocardiograma (ECG), comunicação, etc (ARAÚJO, 2011).

A transformada *wavelet* contínua é utilizada com mais ênfase para a análise de sinais. Já a transformada discreta, que também é utilizada para análise de sinais, tem sido muito utilizada para a compressão de dados.

2.5.4 Funções *wavelets* mais conhecidas

Embora existam condições para uma função ser *wavelet*, como as equações (2.1), (2.2) e (2.3), há na literatura algumas funções *wavelets* conhecidas, difundidas e muito utilizadas, já citadas no item 2.5.3, que são a Morlet, chapéu mexicano, Haar e Daubechies, descritos a seguir.

a) Chapéu Mexicano

Essa *wavelet* possui esse nome devido a sua forma gráfica lembrar o adereço caracterizador da tradição mexicana: um grande chapéu sombreiro (Figura 2.7).

A função *wavelet* chapéu mexicano é denotada pela equação (2.4) e a sua representação gráfica é mostrada na Figura 2.8. Essa *wavelet* foi utilizada por Mukai *et al* (1995) para estudar as formas de ondas de correntes e descargas parciais produzidas entre um politereftalato de etileno (PET) e

um eletrodo, criando uma forma de discutir a degradação do material.



Figura 2.7 – Um chapéu sombreiro - adereço da tradição do México

$$\psi(t) = (1 - t^2).e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (2.4)$$

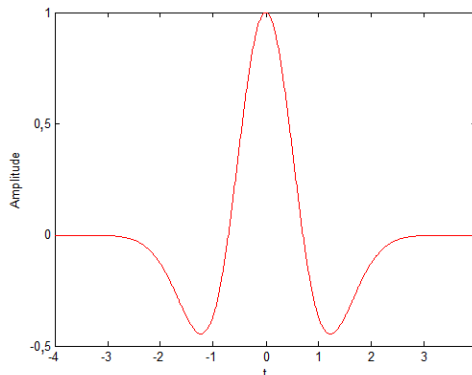


Figura 2.8 – *Wavelet* Chapéu Mexicano.

b) Morlet

A *wavelet* de Morlet é um sinal sinusoidal modulado por uma função de Gauss (PÉREZ *et al.*, 2007). Algumas variações da *wavelet* de Morlet também são muito utilizadas, sendo a principal a *wavelet* complexa de Morlet.

Essa *wavelet* é definida de acordo com a equação (2.5) e a sua representação gráfica é mostrada na Figura 2.9.

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} e^{iw_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (2.5)$$

A *wavelet* complexa de Morlet, equação (2.6), possui algumas vantagens para análise de sinais, pois o algoritmo da *wavelet* complexa pode eliminar a componente contínua e a influência da flutuação da frequência (ZHONGWEI *et al*, 2009).

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f_b}} e^{jw_0 t} e^{-\frac{t^2}{f_b}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f_b}} e^{-\frac{t^2}{f_b}} [\cos(w_0 t) + j \cdot \sin(w_0 t)] \quad (2.6)$$

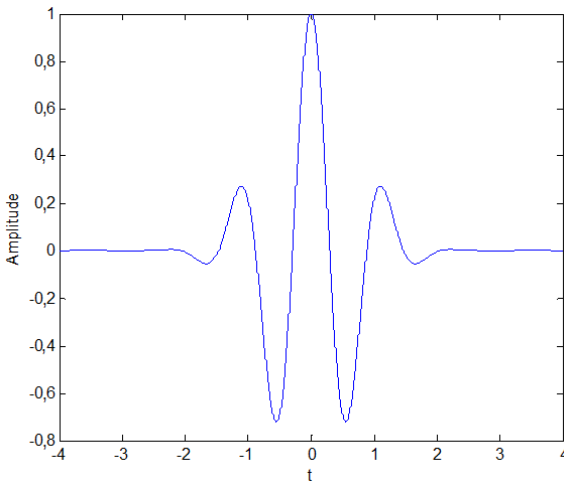


Figura 2.9 – Wavelet de Morlet.

c) Haar

Essa *wavelet*, além de ser a primeira descrita na literatura, também é uma das mais conhecidas e utilizadas. A *wavelet* de Haar é definida de acordo com a equação (2.7).

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 \leq t < 0,5 \\ -1, & \text{se } 0,5 \leq t < 1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.7)$$

A Figura 2.10 mostra a representação gráfica da *wavelet* de Haar.

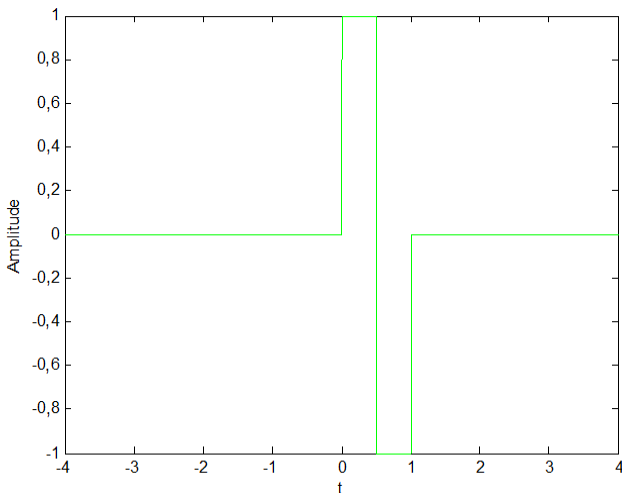


Figura 2.10 – *Wavelet* de Haar.

Diversos trabalhos são encontrados na literatura onde a *wavelet* de Haar é empregada. O reconhecimento de padrões de imagens, por exemplo, é um campo com vasto emprego dessa *wavelet*.

Trabalhos como o de Sanjekar *et al* (2010) são exemplos de usos da *wavelet* de Haar para reconhecimento de imagens, onde nesse caso a imagem a ser reconhecida bem como seus padrões são impressões digitais.

NG *et al* (2010) utilizam em seu trabalho a decomposição rápida de Haar para o reconhecimento da íris humana. A detecção e o reconhecimento da íris foi uma área de pesquisa muito popular na última década. Existem desafios a serem superados neste tipo de desenvolvimento, tais como observar a posição e angulação da íris no momento da captura da imagem, o tamanho e a abertura da região dinâmica da pupila e, juntando-se todos esses desafios, acrescenta-se que a

identificação na ampla maioria dos casos é feita em tempo real (NG *et al*, 2010).

d) Daubechies

A *wavelet* de Daubechies na verdade é uma *família* de funções, que são denotadas por Dbxx, sendo “xx” a ordem da família a ser utilizada. A Figura 2.11 apresenta a *wavelet* de ordem 15 – Db15.

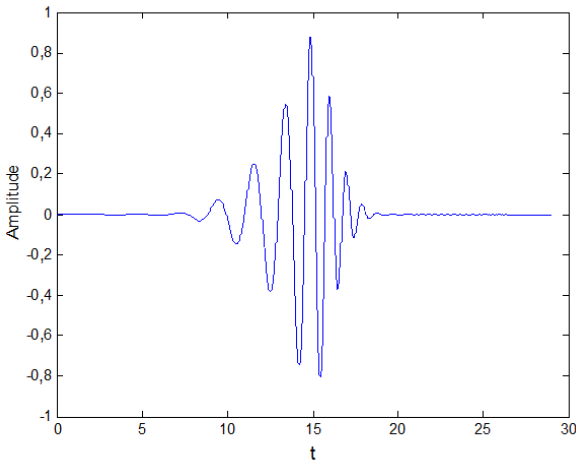


Figura 2.11 – *Wavelet* de Daubechies Db15.

Ingrid Daubechies utilizou os trabalhos de Mallat (1989) para criar bases ortonormais de *wavelets* suaves. Os trabalhos da Daubechies são os alicerces das principais aplicações atuais de *wavelets* (LIMA, 2002).

A Tabela II.1 do Anexo II, adaptada de (VRIES, 2013), apresenta os valores dos coeficientes de Daubechies desde a 2^a até a 20^a ordem .

2.5.5 Transformada *Wavelet* Contínua

Semelhantemente à Transformada de Fourier, a Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) também é definida como uma integral por toda a extensão temporal, mas a multiplicação é feita pelas versões da *wavelet* mãe escaladas e transladadas no tempo, como mostrado na equação (2.8).

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \Psi_{(a,b)}(t) dt \quad (2.8)$$

onde:

$C(a, b)$ é o coeficiente *wavelet* referido aos valores de “ a ” e “ b ”;

a é a dilatação (escala);

b é o deslocamento;

$s(t)$ é o sinal de entrada;

$\Psi_{(a,b)}(t)$ é a *wavelet* referida aos valores de “ a ” e “ b ”;

t é o tempo.

O coeficiente da TWC, observadas escalas e translações distintas $C(a, b)$ indica um grau de correlação entre o sinal original $s(t)$ e a *wavelet* mãe associada. O cálculo da transformada *wavelet* contínua pode ser efetuado em cinco passos (MISTI, 2007):

- 1) Escolha da *wavelet* desejada $\Psi_{(a,b)}(t)$. Esta deve ser posicionada no início do sinal original $s(t)$.
- 2) Calcular $C(a, b)$ através da equação (2.8);
- 3) Deslocar a *wavelet* para a direita, ou seja, modificar o valor de “ b ” e repetir os dois

primeiros passos até que todo o sinal original tenha sido percorrido pela *wavelet*.

- 4) Realizar um escalonamento da *wavelet* modificando o valor de “ a ” e repetir os três primeiros passos;
- 5) Repetir todos os passos anteriores para todas as escalas desejadas.

Para exemplificar este processo dos cinco passos, é utilizado um sinal $s(t)$ que possui 4 frequências distintas, conforme a Figura 2.12, onde “Frequência 1” < “Frequência 2” < “Frequência 3” < “Frequência 4”. Neste exemplo, o sinal original é representado em vermelho.

Utilizando um valor de escalonamento “ a ” na *wavelet*, que está em azul na Figura 2.13, calcula-se do valor de $C(a, b)$ e depois translada-se (altera o valor de “ b ”) a *wavelet* e repete-se o processo até a *wavelet* percorrer todo o sinal original $s(t)$.

Assim que percorrido todo o sinal um novo valor de escalonamento de “ a ” é escolhido, vide Figura 2.14, e repete-se o processo do cálculo de $C(a, b)$ e transladando a *wavelet* até percorrer todo o sinal.

Após repetir esse processo para os diversos valores desejados de “ a ”, é possível agrupar os valores calculados num gráfico de nível, de tal forma que se possa associar esse gráfico à uma tabela visual, representada pela Figura 2.15, onde as menores escalas a ficam no topo, representando as maiores frequências, enquanto as maiores escalas ficam na parte mais inferior, representando as maiores frequências. Nesta figura, observa-se que quanto melhor a representação de escala pior é a representação temporal (translação) e o oposto também ocorre (quanto melhor é a representação temporal pior é a escala).

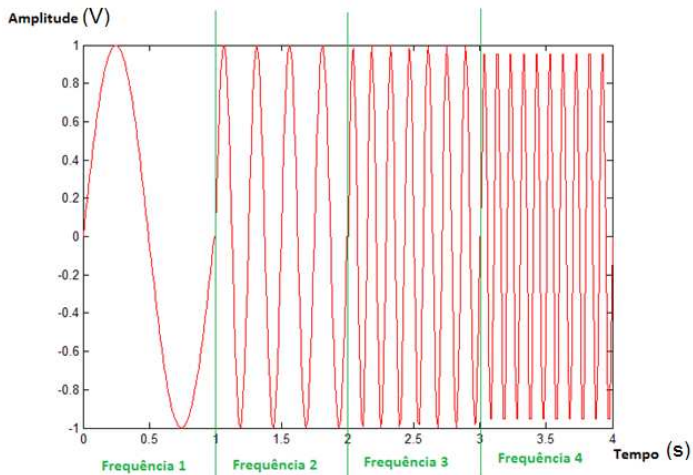
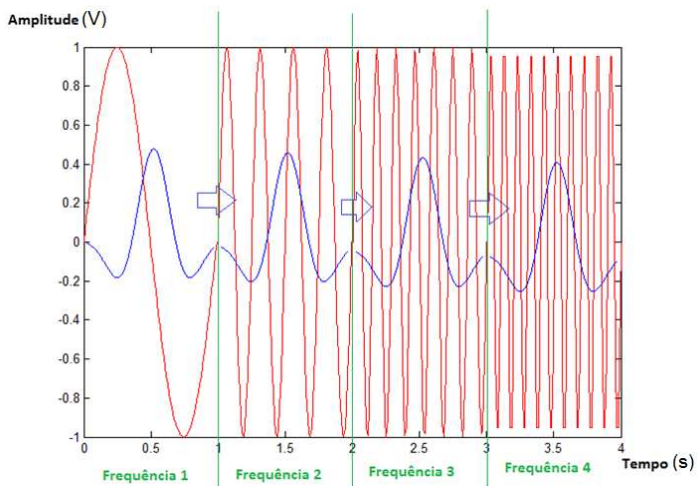


Figura 2.12 – Sinal com frequências distintas.

Figura 2.13 – Escalonamento e translação da *wavelet* no sinal original.

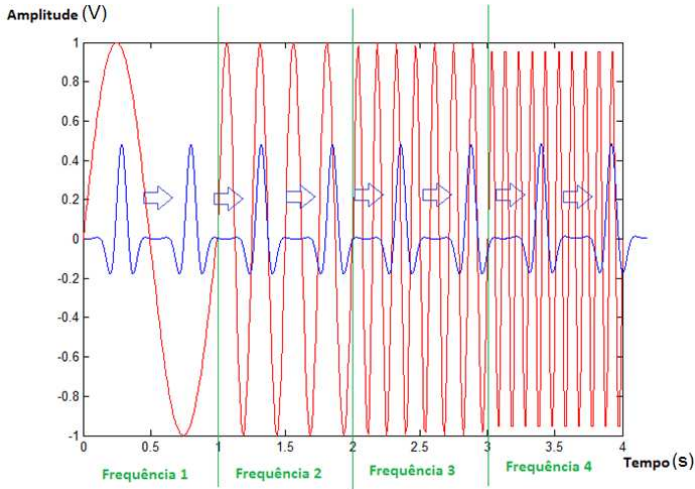


Figura 2.14 – Novo Escalonamento e translação.

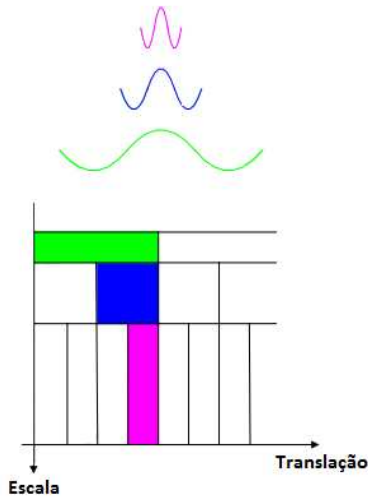


Figura 2.15 – Gráfico Translação x Escala.

A Figura 2.16 contém a representação gráfica do exemplo apresentado, onde, para dar destaque visual, utilizou-se o padrão de gráfico de nível e então é possível observar que as quatro frequências aparecem distintamente no gráfico.

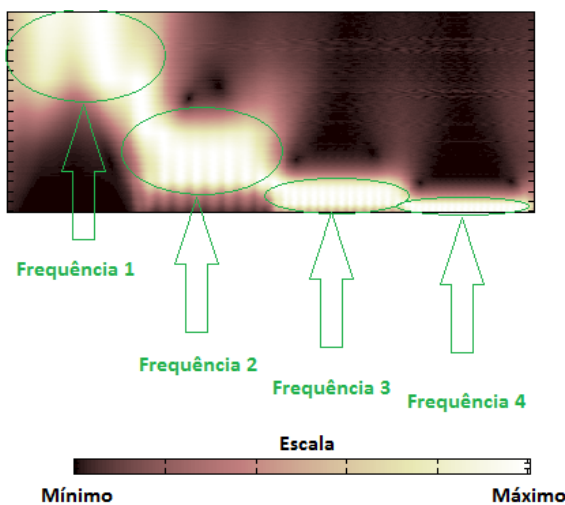


Figura 2.16 – Gráfico Deslocamento x Escala do exemplo.

Com o intuito de analisar sinais digitais, ou até mesmo realizar a compressão de imagens digitais, a transformada utilizada é a Transformada Wavelet Discreta (TWD).

2.5.6 Transformada *Wavelet* Discreta

No tutorial publicado por Kim *et al* (2000), os autores destacam que as *wavelets* podem ser utilizadas em eventos não periódicos. Esses autores também afirmam que *wavelets* com variações abruptas (como a *wavelet* de Haar) são indicadas para análises onde se deseja uma melhor resolução no domínio do tempo. Já as *wavelets* suaves são mais indicadas para análises com uma melhor resolução de frequência.

A Transformada *Wavelet* Discreta consiste, de um modo mais amplo, na realização de subamostragens do sinal de entrada através de filtros digitais. Esses filtros digitais são um banco de filtros que são compostos por coeficientes h_n que correspondem ao filtro passa-alta e pelos coeficientes g_n correspondentes ao filtro passa-baixa.

Com os filtros h e g é possível então realizar os cálculos para encontrar os coeficientes de aproximação e detalhamento, através da equação (2.9).

$$\begin{bmatrix} ca(0) \\ cd(0) \\ ca(1) \\ cd(1) \\ \vdots \\ ca\left(\frac{n}{2}-1\right) \\ cd\left(\frac{n}{2}-1\right) \end{bmatrix} = [W] \cdot \begin{bmatrix} s(0) \\ s(1) \\ s(2) \\ s(3) \\ \vdots \\ s(n-1) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

O coeficiente de aproximação é denotado por ca ao passo que o coeficiente de detalhamento é denotado por cd , s representa o sinal de entrada e a matriz W é representada pela equação (2.10).

$$W = \begin{bmatrix} h(0) & h(1) & h(2) & h(3) & \dots & h(l) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ g(0) & g(1) & g(2) & g(3) & \dots & g(l) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & h(0) & h(1) & \dots & h(l-2) & h(l-1) & h(l) & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & g(0) & g(1) & \dots & g(l-2) & g(l-1) & g(l) & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h(l-1) & h(l) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & h(0) & h(1) & \dots & h(l-2) \\ g(l-1) & g(l) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & g(0) & g(1) & \dots & g(l-2) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Esses coeficientes (ca e cd) possuem, cada um, metade da banda de frequência do sinal que foi submetido à TWD (coeficiente de aproximação fica com a metade inferior da banda e o coeficiente de detalhamento com a metade superior)

e cada um desses coeficientes podem sofrer novamente a transformada *wavelet* recursivamente, conforme a necessidade.

Para um melhor entendimento, a Figura 2.17 mostra graficamente um sinal exemplo $s(t)$ que possui quatro frequências distintas. As frequências utilizadas nesse exemplo estão descritas na Tabela 2.1.

O sinal original $s(t)$ é composto pelas frequências de 25, 45, 80 e 125 Hz. Entretanto, as frequências não aparecem misturadas em todo o sinal, elas aparecem, cada uma, em um tempo distinto, com exceção do sinal de 150 Hz que aparece somado ao sinal de 45 Hz num curto período de tempo.

Tabela 2.1 – Frequências e faixas de tempo do sinal exemplo.

Frequência	Tempo (amostra)
80 Hz	1 a 154
45 Hz	155 a 309
25 Hz	310 a 460
150 Hz	215 a 221

De acordo com o teorema de Nyquist, a frequência de amostragem de 512 Hz permite observar componentes no sinal amostrado até a frequência de 256 Hz.

Com o sinal já amostrado executa-se a TWD neste sinal e obtém-se como resposta o coeficiente de aproximação ca_1 e o coeficiente de detalhamento cd_1 , possuindo cada um metade da banda do sinal original, ou seja, o coeficiente de aproximação possui o sinal com a banda de 0 a 128 Hz enquanto que o coeficiente de detalhamento possui a banda de 129 a 256 Hz. É possível observar na Figura 2.17 na 1ª iteração os coeficientes ca_1 e cd_1 e, observando o sinal cd_1 se constata que a frequência mais elevada (150 Hz) foi separada com sucesso e aparecendo temporalmente no meio do sinal cd_1 , igual ao sinal original, mostrando a localização temporal de sua ocorrência.

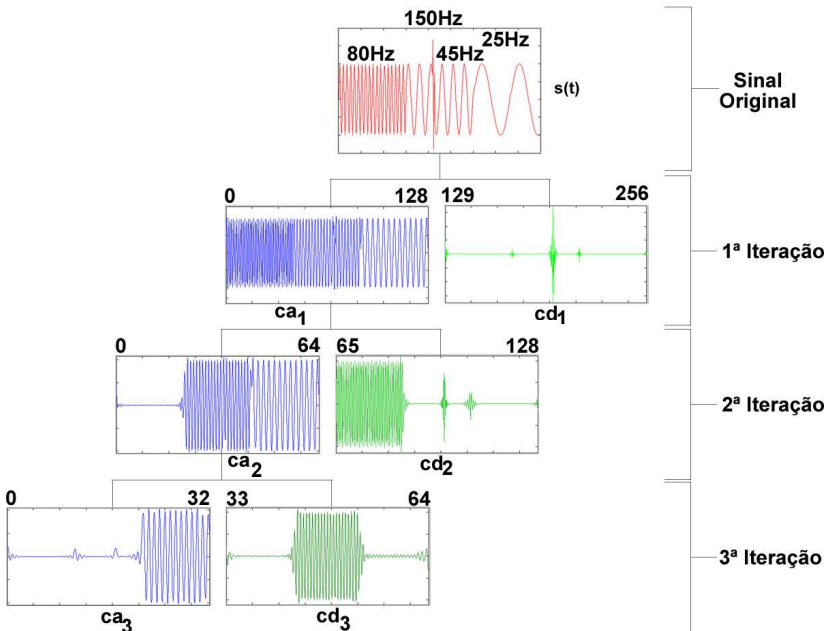


Figura 2.17 – Coeficientes de aproximação e detalhamento do sinal exemplo.

Com o objetivo de separar as outras frequências, realiza-se mais uma iteração da TWD, utilizando agora como sinal de entrada o sinal cuja banda de frequência deseja-se separar, neste caso o ca_1 . A execução da TWD fornece os sinais ca_2 e cd_2 , onde cada um possui metade da banda de sinal do ca_1 : o coeficiente de aproximação ca_2 contempla as bandas de 0 a 64 Hz enquanto que o coeficiente de detalhamento possui o complemento (65 a 128 Hz). Observando o sinal cd_2 nota-se que a parte do sinal onde havia a componente de 80 Hz foi separada com sucesso. Também é possível observar no cd_2 a existência de mais dois trechos onde o sinal não é nulo, que são provenientes da transição das frequências de 45 Hz para 150 Hz e da frequência de 45 Hz para 25 Hz no sinal original.

Por fim, para separar as frequências de 25 Hz e 45 Hz basta realizar uma nova iteração da TWD utilizando como sinal de entrada o coeficiente de aproximação ca_2 , gerando então os

coeficientes ca_3 e ca_3 , possuindo as bandas de frequência de 0 a 32 Hz e de 33 a 64 Hz, respectivamente.

A Figura 2.18 apresenta um resumo da divisão de banda realizada nas iterações da TWD do exemplo explorado.

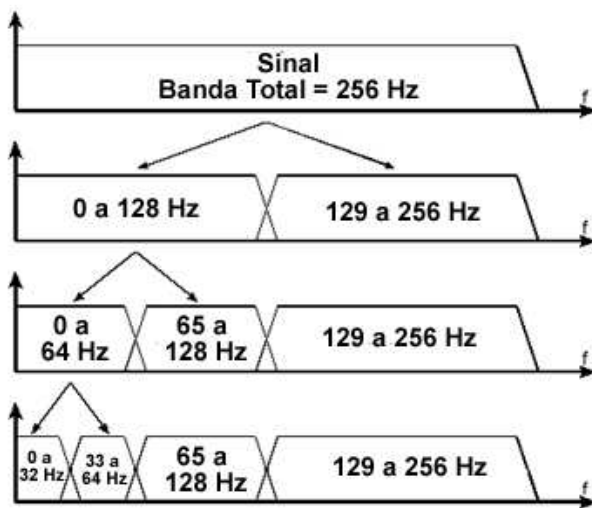


Figura 2.18 – Resumo da divisão de banda do exemplo.

Na análise de um sinal elétrico que sofre uma perturbação de qualquer natureza, essa perturbação manifesta-se por uma componente com frequência maior que a do sinal monitorado. Logo, o coeficiente de detalhamento possuirá maior importância que o coeficiente de aproximação, diferentemente do exemplo citado.

Analisando-se então um sinal com perturbação na TWD, é necessário selecionar um método auxiliar capaz de identificar nos coeficientes de detalhamento os pontos importantes ou de destaque. Os métodos mais utilizados são o *Hard Wavelet Threshold* (HWT) e o *Soft Wavelet Threshold* (SWT).

2.6 *Hard Wavelet Threshold (HWT)*

Os coeficientes *wavelet* das primeiras iterações geralmente são suficientes para localizar componentes de altas frequências de eventos no sistema. Porém, sinais reais apresentam ruídos que tendem a dificultar a identificação de tais componentes.

Para atenuar esses ruídos, são utilizadas técnicas de filtragem baseadas no valor absoluto dos coeficientes *wavelet* (CHEN *et al*, 2003). As principais técnicas tradicionais consistem em zerar (eliminar) os valores dos coeficientes *wavelets* que estejam abaixo de uma porcentagem do valor absoluto do maior valor encontrado.

A técnica mais comum de filtragem chama-se *Hard Wavelet Threshold* (SANTOSO *et al*, 1997). Nessa técnica define-se um limiar λ representado pela equação (2.11), onde L indica o percentual a ser determinado do maior valor do coeficiente de detalhamento, sendo $0 \leq L < 1$.

Uma vez calculado o limiar λ , reescreve-se o coeficiente de detalhamento, agora chamado de $\widehat{cd}_j(k)$, utilizando a equação (2.12), que, caso o valor do coeficiente de detalhamento da amostra k no nível j seja maior que o limiar λ estabelecido, manter-se-á o valor de $cd_j(k)$; caso contrário, esse valor será zerado.

É possível fazer uma pequena modificação na equação (2.12) para que o novo valor do coeficiente filtrado, chamado de $\widehat{cd}_j(k)$, seja unitário nos valores em que a condição $|cd_j(k)| \geq \lambda$ for atendida. Essa modificação está representada através da equação (2.13).

$$\lambda_j = L \cdot \max(|cd_j|), \text{ para } j=1,2,\dots,n \quad (2.11)$$

$$\widehat{cd}_j(k) = \begin{cases} cd_j(k), & \text{se } |cd_j(k)| \geq \lambda \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\widetilde{cd}_j(k) = \begin{cases} 1, & \text{se } |cd_j(k)| \geq \lambda \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.13)$$

Retornando ao exemplo apresentado na subseção 2.5.6, supondo que se deseje localizar no tempo a ocorrência da frequência de 150 Hz. Neste caso, com a decomposição das frequências (obtenção dos coeficientes ca e cd) efetuada conforme a Figura 2.17, já foi observado que a frequência de 150 Hz foi isolada nos coeficientes cd_1 , apresentados na Figura 2.19.

Empregando-se o valor limiar λ na filtragem de 80% do maior coeficiente *wavelet* ($L = 0,8$) e utilizando a equação (2.13), o resultado alcançado (Figura 2.20) contém dois pontos com amplitude 1 e o restante tem amplitude 0. Estes dois pontos indicam a localização temporal da frequência desejada. O primeiro ponto está no tempo 215 e o segundo no tempo 217. Como se deseja localizar o início da frequência de 150 Hz, o primeiro ponto é o desejado.

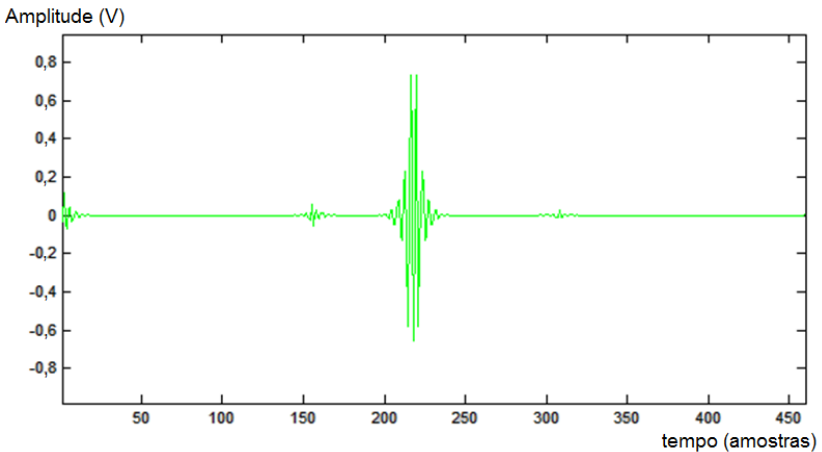


Figura 2.19 – Coeficientes de detalhamento cd_1 do sinal exemplo.

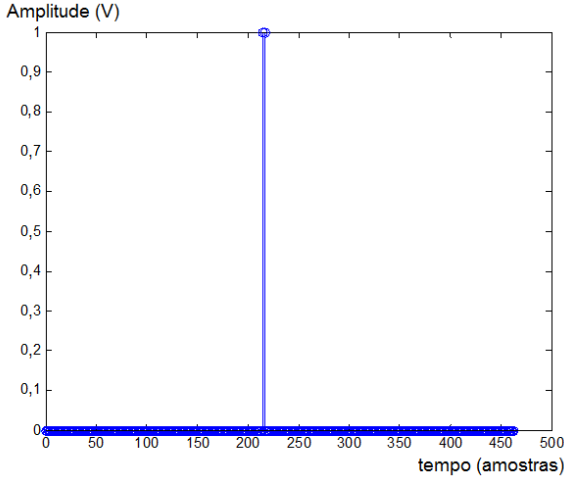


Figura 2.20 – Saída após a filtragem do HWT.

2.7 *Soft Wavelet Threshold (SWT)*

Esta técnica é principalmente voltada para redução de ruídos. A equação (2.14) fornece as condições para a filtragem, onde $\widehat{cd}_j(k)$ são os coeficientes wavelet após essa filtragem e $\text{sgn}[cd_j(k)]$ é o sinal de $cd_j(k)$, ou seja +1, 0 ou -1.

$$\widehat{cd}_j(k) = \begin{cases} \text{sgn}[cd_j(k)] \cdot [|cd_j(k)| - \lambda], & \text{se } |cd_j(k)| \geq \lambda \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.14)$$

Frooq e Datta (2003) mostram que quando aplicada essa técnica de *threshold* para remoção de ruídos, os resultados são melhores que o HWT.

A Figura 2.21 (SIQUEIRA, 2011) mostra um exemplo de remoção de ruídos através de um sinal genérico. Os valores colocados nos coeficiente de detalhamento não representam os valores reais, são apenas exemplos para o entendimento desse tipo de *threshold*.

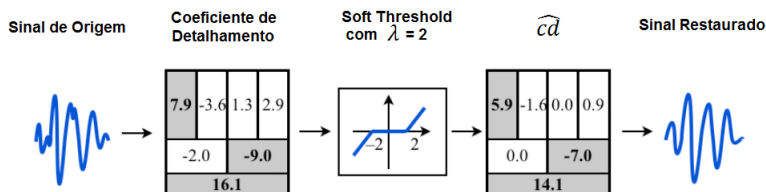


Figura 2.21 – Exemplo de SWT (SIQUEIRA, 2011).

2.8 Considerações

Os sistemas supervisórios são importantes para a monitoração do sistema elétrico, e dentre as soluções existentes, o mais difundido é o sistema SCADA. Este sistema é fundamentalmente utilizado para o monitoramento em regime permanente, quase estático, ao passo que novas tecnologias (destaque para o SMFS) aplicam a sincronização de medidas para disponibilização de fasores de tensão e corrente com elevada resolução.

A elevada resolução permite observar a dinâmica do sistema. Para manipular essa quantidade elevada de dados com a finalidade de detectar algum tipo de perturbação no sinal, a transformada *wavelet* é uma ferramenta que se mostra robusta, pois ela é capaz de decompor o sinal em diferentes escalas de tempo e frequência, conseguindo apontar o instante de tempo onde ocorre cada frequência.

Com a subdivisão do sinal original em diferentes bandas de frequência, a *Hard Wavelet Threshold* é a melhor ferramenta auxiliar à transformada *wavelet* encontrada que pode ser utilizada para apontar os locais de maior incidência da banda de frequência no qual se tem interesse.

A associação de dados de medição fasorial sincronizada, a utilização da transformada *wavelet* discreta para separar o sinal em bandas de frequência e a identificação do instante de tempo da incidência de altas frequências (comparado com a frequência do sinal original) serão exploradas no próximo

capítulo para descrever a metodologia proposta por este trabalho na identificação de eventos no SEP.

3 DESENVOLVIMENTOS E METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 Introdução

O presente capítulo aborda sobre ilhamento e a metodologia proposta, sendo inicialmente descrito o ilhamento, como se caracteriza e como é seu comportamento através de representações gráficas das suas principais grandezas elétricas. A seguir, apresenta-se a classificação de técnicas de detecção de ilhamento.

Basicamente, ilhamento ocorre quando parte de uma rede do sistema elétrico fica eletricamente isolada do sistema interligado ou até mesmo da concessionária, mas ainda continua energizada pelas fontes de energia elétrica conectadas a esse sistema, porém agora de forma isolado.

Um gerador, quando conectado em paralelo ao sistema elétrico possuirá, obrigatoriamente, a mesma frequência do sistema ao qual está conectado, fazendo com que seja controlada a sua velocidade e tensão de tal forma a evitar alterações na frequência e tensão em seus terminais (KUMPULAINEN *et al*, 2004). Mas quando o sistema elétrico é desconectado, o gerador continua a atender a uma determinada carga de forma isolada, configurando o ilhamento.

Nesta circunstância, o gerador pode acelerar ou desacelerar devido à nova configuração da carga atendida, do regulador de velocidade e de seus aspectos dinâmicos (NAISANI *et al*, 2010).

3.2 Ilhamento

A identificação de um ilhamento é uma tarefa muito importante para a segurança e o controle do SEP (GÜLLER e GROSS, 2007). A detecção de ilhamento nos sistemas de

transmissão em SEPs tem ganhado importância na análise de segurança e controle, pois os ilhamentos podem, inclusive, levar o SEP à perda de estabilidade (transitória, tensão ou frequência) acarretando no colapso do fornecimento de energia (THEODORO *et al*, 2010).

Geralmente a perda da estabilidade do SEP está associada a uma grandeza elétrica específica, de modo que, em termos de análise, a estabilidade seja comumente classificada observando a natureza do fenômeno predominante (DECKER *et al*, 2007).

Para ilustrar um caso de ilhamento, é apresentado um caso hipotético de dois subsistemas “A” e “B” interligados entre si por um par de linhas de transmissão, conforme a Figura 3.1. Nessa ilustração, supõe-se que a região “B” possua maior concentração de fontes geradoras (hidrelétricas, termelétricas, renováveis, etc) se comparada à região “A”.

A tensão na barra “A” é $V_a \angle \theta_a$, na barra “B” é $V_b \angle \theta_b$ e a frequência do sistema é 60 Hz. A Figura 3.2 mostra uma ilustração do comportamento da tensão em regime permanente; a Figura 3.3 o comportamento da frequência e a Figura 3.4, a diferença angular entre ambos ($\theta_b - \theta_a$), sendo usado como referência angular o subsistema “B”.

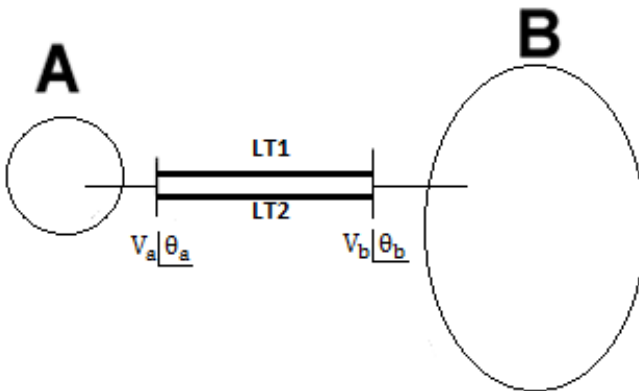


Figura 3.1 – Dois subsistemas interconectados.

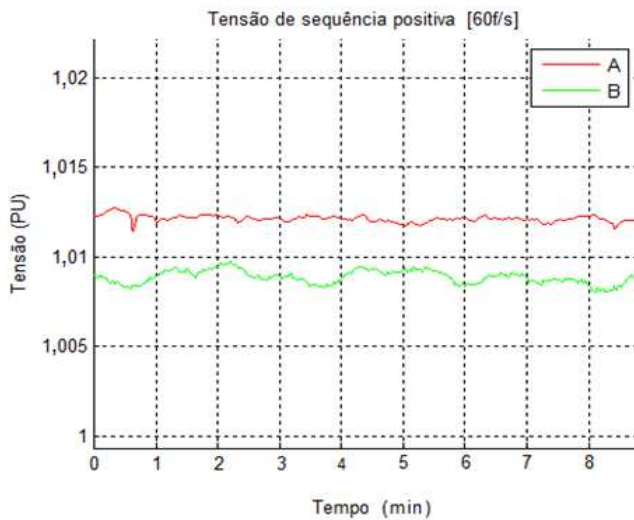


Figura 3.2 – Tensão em regime permanente.

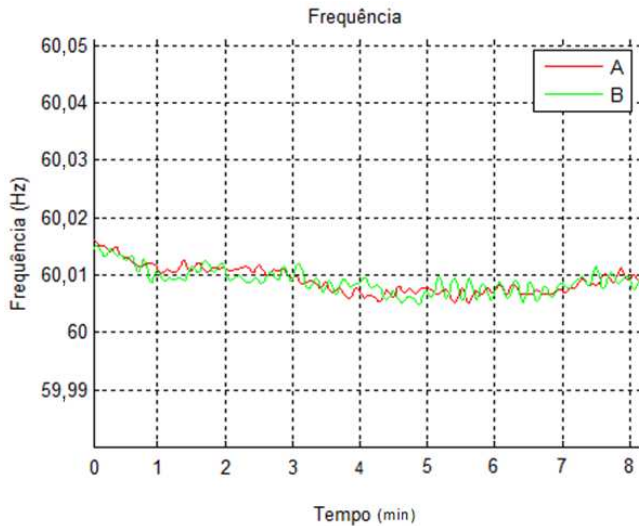


Figura 3.3 – Pequena variação de frequência.

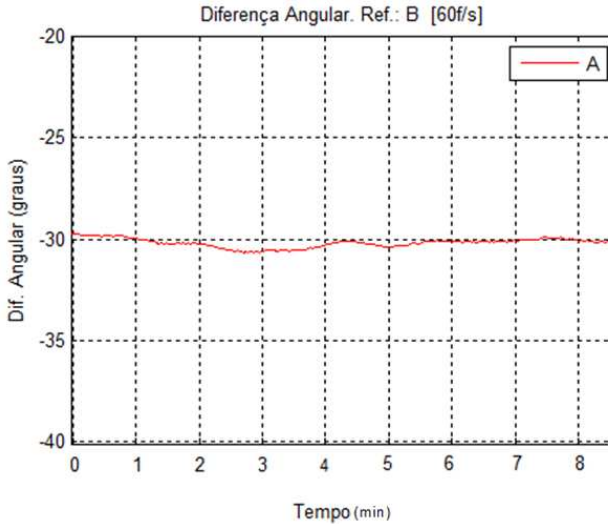


Figura 3.4 – Abertura angular com pequena variação.

Supondo que por uma descarga atmosférica as proteções das linhas operem e abram os circuitos de interligação (as linhas de transmissão LT1 e LT2), ocasionando um ilhamento em “A” e, como a maior concentração de fontes geradoras está na região “B”, ocorrerá *deficit* de geração em “A”.

Ao observar a Figura 3.5, percebe-se que ambos os sistemas encontravam-se com frequência constante até a perturbação, onde ocorreu a instabilidade de frequência, sendo que a região “B” sofreu com acréscimo da frequência e a região “A”, devido ao seu *deficit* de geração nessa nova situação, sofre com queda da frequência do seu sistema.

A Figura 3.6 mostra a diferença angular entre os subsistemas “A” e “B” (sendo “B” a referência angular). A abertura angular está crescendo indefinidamente, porém o gráfico possui esse comportamento porque os valores são mostrados na faixa entre -180° a $+180^\circ$. É possível observar que a diferença entre ambos os sistemas era praticamente constante até o início da perturbação.

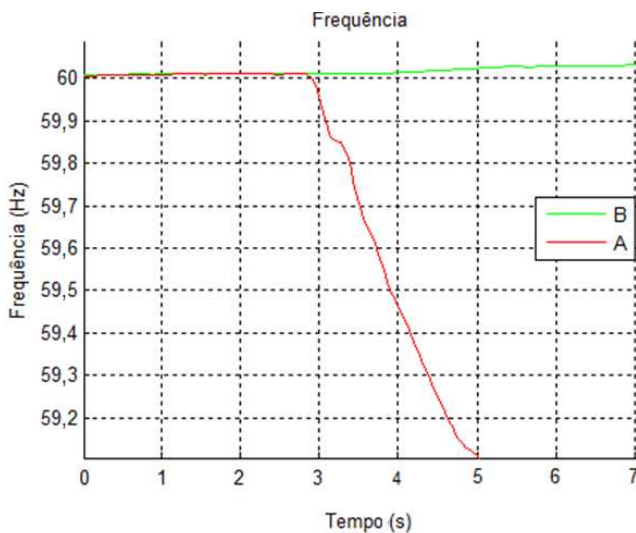


Figura 3.5 – Instabilidade de frequência.

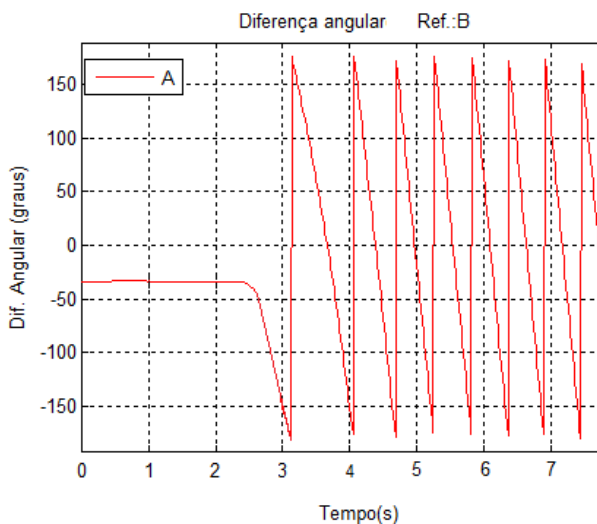


Figura 3.6 – Instabilidade angular.

As técnicas empregadas para a detecção de ilhamento são classificadas em duas classes principais e estas são subdivididas em subclasses. Nessas subclasses existem inúmeras técnicas e a

sua escolha depende de sua viabilidade técnica e econômica (VIEIRA, 2006). Uma visão geral dessa classificação é apresentada na Figura 3.7, adaptado de Pujhari (2009).

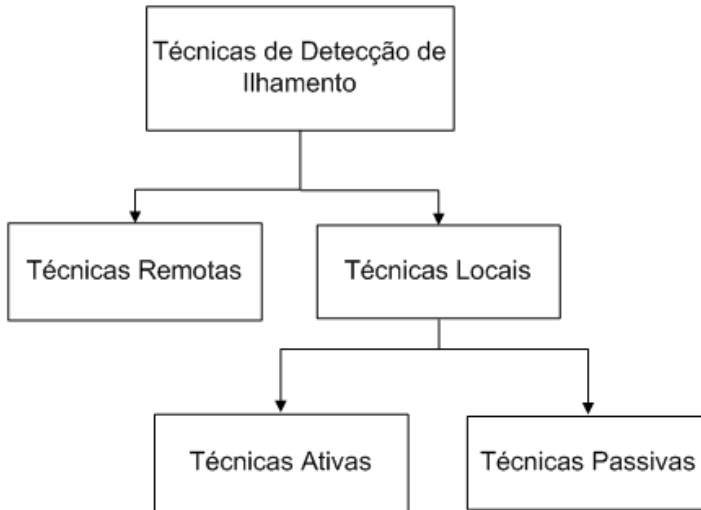


Figura 3.7 – Classificação das técnicas de detecção de ilhamento.

Para a detecção de ilhamentos, os dados mais apropriados são a frequência e a defasagem angular (ZANG *et al*, 2011). Num estudo envolvendo a monitoração utilizando como grandeza de medida a frequência, Zang *et al* (2011) analisam as características dos distúrbios dos sistemas elétricos através do monitoramento via rede de monitoração de frequências FNET (*Frequency Monitoring Network*) no período de 2009 e 2010. Através destes estudos, ferramentas foram desenvolvidas, incluindo alertas de distúrbios, triangulação da localização do evento, detecção de oscilação e ferramentas de visualização em tempo real.

Para criar uma técnica de detecção de ilhamento e analisar o desempenho de um relé ROCOF (do inglês *Rate of Change of Frequency Relay* – Relé de taxa de variação de frequência), Ding e Crossley (2005) utilizam a medição fasorial

como base em suas pesquisas para observar alguns fatores que alteram a capacidade de detecção desses relés, como o tipo de carga. Uma breve descrição sobre o relé ROCOF é feita no item A.4 do Apêndice A deste trabalho.

Para obter uma melhor visualização de transitórios utilizando medidas de frequência, Hojo *et al* (2003) apresentam um sistema global *on-line* de monitoração da dinâmica do sistema elétrico baseado em uma técnica de medição fasorial sincronizada, utilizando estampas de tempo do sistema GPS e internet.

3.2.1 Técnicas remotas de detecção de ilhamento

As técnicas remotas mais conhecidas são as técnicas baseadas em sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition* – explorado na subseção 2.2), técnicas baseadas em sistema PLCC (*Power Line Carrier Communication*) e rede de comunicação entre relés.

a) Técnicas baseadas em sistema SCADA

Nos esquemas de proteção contra ilhamento, a ideia é monitorar os disjuntores (através de seus estados). Na ocorrência de um evento de ilhamento, o sistema SCADA identifica a área isolada, podendo ser acionado o esquema de teleproteção para, por exemplo, comandar o desligamento de um gerador distribuído (MOZINA, 2001).

Embora eficiente, a desvantagem dessa técnica é sua implantação, pois os custos são elevados e tendem a aumentar conforme a complexidade do sistema (XU *et al.*, 2004).

b) Técnicas baseadas em sistema PLCC

Nesta técnica, mais comumente usada em geradores distribuídos, um gerador de sinais é conectado ao secundário

do transformador de uma subestação de uma concessionária e sua função é enviar continuamente sinais de baixa frequência (comumente abaixo de 500 Hz) para os alimentadores (ROPP *et al*, 2000).

Esse sinal enviado trafega pela própria rede elétrica e, quando algum gerador distribuído não receber o sinal do gerador da subestação, o sistema entende como uma condição de ilhamento.

As vantagens das técnicas baseadas em sistema PLCC incluem a alta confiabilidade e a facilidade de implementação (já que uma mudança topológica não afeta seu desempenho). Já as desvantagens associadas incluem os custos do transmissor e receptor.

c) Rede de comunicação entre relés

Todos os dispositivos que são aplicados em esquemas de proteção contra ilhamentos são interligados por uma rede de comunicação, pois necessitam trocar informações para minimizar a possibilidade de falsa operação e aumentar a capacidade de detecção. (VIEIRA, 2006). Essa rede de comunicação pode ser feita pela porta RS 232, RS 485, PLCC, WAN (*Wide Area Network*) através do protocolo TCP/IP.

3.2.2 Técnicas locais de detecção de ilhamento

As técnicas locais procuram detectar o ilhamento através de medidas das grandezas elétricas, como tensão e corrente, nas subestações. Essas técnicas se dividem em ativas e passivas.

a) Técnicas Ativas

As técnicas ativas são utilizadas na detecção de ilhamentos em sistemas com geração distribuída. A medida de impedância é uma técnica que pode ser usada para a detecção de ilhamentos. Kane e Fox (1997) utilizam um sinal de alta

frequência, injetada no sistema, para realizar a medição da impedância no sistema, pois a impedância observada pelo gerador distribuído aumenta após o ilhamento.

Kim e Hwang (2000) utilizam uma técnica ativa através da variação da tensão nominal e potência reativa entregue pelo gerador. Utilizada em geradores síncronos, uma vez que necessita regular a tensão da máquina, são inseridas pequenas variações na tensão do gerador e então monitora-se a saída (potência reativa), observando que, se houver grandes variações da potência reativa o gerador estará operando de forma isolada (KIM e HWANG, 2000).

b) Técnicas Passivas

As técnicas passivas baseiam-se na medição de grandezas elétricas e a detecção do ilhamento ocorre quando há variação significativa dessas grandezas. As principais grandezas monitoradas são potência, tensão e corrente. Caso essas grandezas monitoradas ultrapassem um limite preestabelecido, o sistema (técnicas passivas) atua sinalizando o ilhamento (PUJHARI, 2009).

Esquemas de proteção contra ilhamentos, muito difundidos devido ao seu custo de implantação ser atrativo e de fácil instalação, são os relés baseados em medidas de frequências (FUNABASHI *et al*, 2003). Seu funcionamento baseia-se na medição da frequência elétrica do sistema, uma vez que quando há um desbalanço excessivo entre a potência ativa da carga ilhada e da geração, ocorre uma grande variação da frequência desse subsistema ilhado. É explorado no Apêndice A o princípio de funcionamento e as características dos relés que utilizam a frequência do sistema elétrico do sistema em suas medições, os relés de sobrefrequência e subfrequência, e o relé de taxa de variação de frequência.

Já Pan *et al* (2012) utilizam o método baseado em *wavelets* para analisar múltiplos sinais e detectar os modos de

oscilação presentes nos sinais, bem como as suas formas modais (*mode-shapes*), que levam em consideração a amplitude e fase dos sinais, esboçado em gráficos polares. Esse trabalho apresenta os conceitos fundamentais da Transformada *Wavelet*, destacando sua capacidade em detecção de eventos no sistema analisado, neste caso o sistema elétrico. Semelhante trabalho no uso de *wavelets* para identificação deilhamento é realizado no trabalho de Sharma e Singh (2012).

Galvan *et al* (2009) discutem o uso de PMUs na detecção e identificação de ilhamentos, depois da ocorrência do furacão *Gustav* ocorrido nos Estados Unidos no dia 01 de Setembro 2008, atingindo principalmente o estado de Louisiana. Nesse estudo, concluem sobre a importância do uso das PMUs, que são vitais na detecção da condição de ilhamentos.

A importância do uso de PMUs e de sincrofasores para identificação de ilhamentos também é discutida no trabalho de Galvan e Matthew (2012), mencionando que a frequência é um importante indicador da integridade do sistema elétrico e no final do trabalho há uma breve discussão sobre o uso de sincrofasores para monitorar a restauração do sistema à condição pré-ilhamento.

3.3 Metodologia Proposta

É trabalhoso realizar uma análise apenas observando o gráfico comportamental das grandezas elétricas, como no exemplo apresentado na subseção 3.2. Este trabalho propõe utilizar a Transformada *Wavelet* Discreta para apontar no tempo a origem de um evento de ilhamento e gerar, numa forma automatizada, um relatório que fornece os dados das grandezas monitoradas em cada um destes instantes de tempo.

A metodologia proposta foi desenvolvida para detectar e determinar:

- A perda da interligação entre subsistemas com perturbações no SEP que provocam ilhamento;
- O instante de tempo em que deveria atuar a rejeição de carga;
- O instante de tempo em que efetivamente é detectada a rejeição de carga;
- O instante de tempo da ressincronização.

As detecções se baseiam nos valores de tensão, frequência e abertura angular entre fasores de diferentes PMUs.

Os valores dos módulos de tensão são observados de uma forma especial, pois eles são analisados como uma informação de continuidade do sinal, uma vez que quando há interrupção de dados a tensão cai para zero, mas a PMU continua a gravar dados de frequência (ruídos).

A Figura 3.8 mostra o fluxograma que descreve a metodologia desenvolvida. Houve a necessidade de aplicar uma janela deslizante, para reduzir a dimensão da matriz W . Sem a aplicação da janela deslizante a matriz W , definida pela equação (2.10), teria dimensão igual ao número de amostras do sinal de entrada.

Como os registros de eventos podem ter diferentes durações e se está trabalhado com medições de 60 fasores por segundo, uma análise de um minuto sem a utilização da janela deslizante, implicaria numa matriz W de 3600 x 3600 pontos, ou seja, 12.960.000 (doze milhões e novecentos e sessenta mil) dados de ponto flutuante. Caso fosse calculada a TWD para todo o sinal simultaneamente, seria necessária uma quantidade elevada de memória para armazenamento da matriz W , ocasionando num provável erro por falta de memória do Matlab (*out of memory*).

Para permitir o uso da característica de recursividade da TWD até a última iteração (caso desejado), o tamanho da janela deve ser 2^N , sendo N um número inteiro. Neste trabalho optou-se por uma janela de 512 pontos ($N=9$). Após a execução

da TWD sobre a janela, o resultado é armazenado, a janela é deslocada para os próximos 2^N pontos e executa-se novamente a TWD. O procedimento é repetido até que o final do sinal seja alcançado.

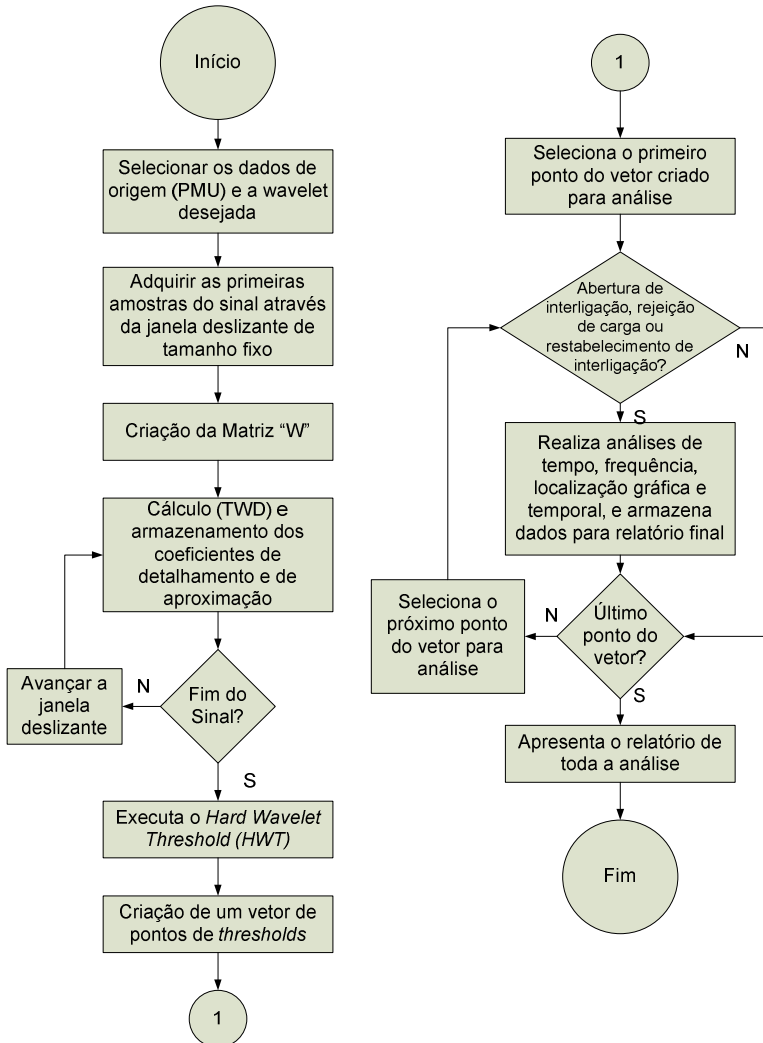


Figura 3.8 – Fluxograma da metodologia desenvolvida.

Para exemplificar, a Figura 3.9 apresenta um sinal de frequência originada em uma das PMUs em atividade (localizada na Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC) e, para analisar o sinal de frequência apresentado é utilizada uma janela deslizante que, depois de feita a análise (TWD e busca por eventos), desliza para os próximos 512 amostras para então repetir as análises. Esse processo é feito até o fim do sinal.

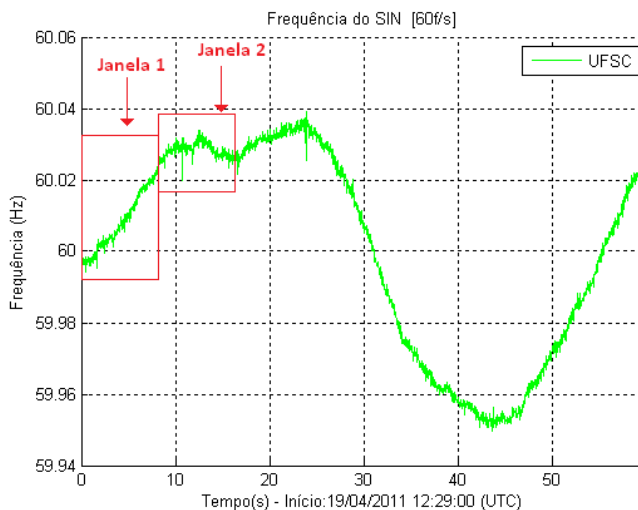


Figura 3.9 – Janela deslizante para análise do sinal.

A possibilidade da recursividade da TWD é explorada nessa metodologia, o qual utiliza como sinal de entrada o próprio sinal da frequência da PMU escolhida e, a partir de então é usada, como entrada, a saída do coeficiente de aproximação obtido na execução anterior da TWD. A

Figura 3.10 mostra na forma de um fluxograma como o aplicativo utiliza como entrada os dados do sinal da PMU selecionada e a utilização dos coeficientes de aproximação.

Na Figura 3.11 é ilustrado um exemplo de coeficientes de aproximação de um sinal de frequência de uma PMU. O sinal

original fica destacado em vermelho. Os sinais em azul são os coeficientes de aproximação em diferentes níveis. É possível perceber nos locais destacados em verde e laranja que, com o avanço das iterações, a curva está se suavizando. Se houvesse mais iterações, a curva tenderia a suavizar ainda mais, ilustrando uma das inúmeras finalidades da transformada *wavelet*: “remoção de ruídos” (BARSANTI, 2010); (FENG *et al*, 2012).

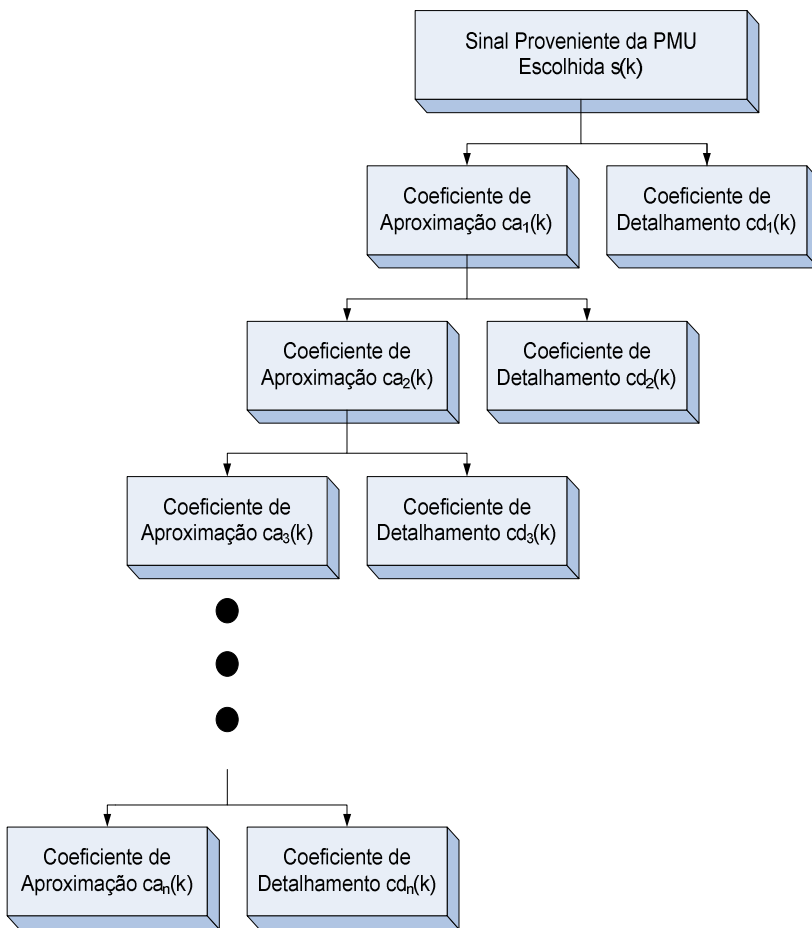


Figura 3.10 – Análise da TWD no aplicativo.

A Figura 3.12 mostra um exemplo de coeficientes de detalhamento de um sinal de frequência. O interessante nesta figura é observar que a amplitude de todo o sinal, num ponto de vista numericamente absoluto, é muito pequeno no tipo de sinal que este trabalho analisa, uma vez que as variações de frequência não são tão elevadas quanto, por exemplo, numa variação de tensão ou corrente numa análise de curto-circuito.

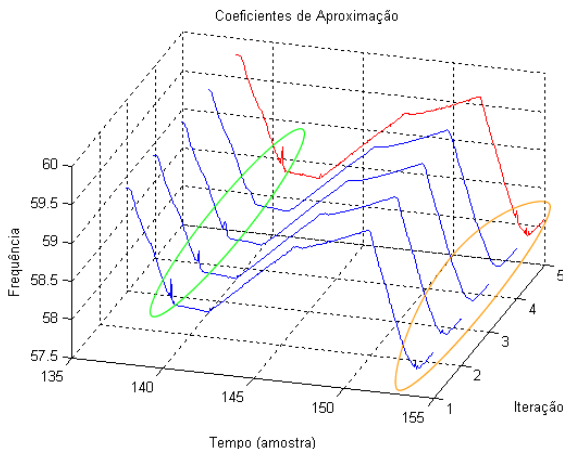


Figura 3.11 – Coeficientes de Aproximação.

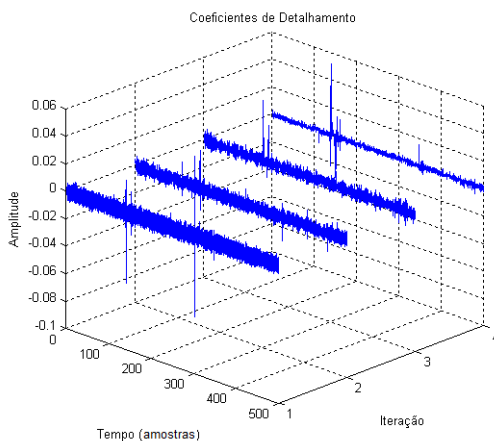


Figura 3.12 – Coeficientes de Detalhamento.

Os coeficientes de detalhamento, em especial, são utilizados pela metodologia, pois serão os responsáveis por apontar os instantes candidatos a uma possível perturbação. O apontamento se faz através do uso do HWT, onde criará um vetor com a localização temporal de cada ponto que será analisado na continuação da metodologia.

Ao receber a localização temporal fornecida pelo HWT, primeiramente é verificado se o valor da amplitude de tensão não é nulo ou próximo de zero pois nesse caso os valores de leitura não são válidos, mas sim algum tipo de ruído (ausência sincrofasores contendo dados reais da rede elétrica monitorada) e que não será útil para a análise (procedimento este que é semelhante ao utilizado com relés de frequência, vide a figura Figura A.2 da subseção A.3 do Anexo A).

3.3.1 Abertura de Interligação

Caso os dados (amplitude) de tensão sejam válidos (atendam o quesito de tensão mencionado no parágrafo anterior) inicia-se então o procedimento de averiguação de ocorrência de perda da interligação. Esse processo consiste na observação da diferença angular frente à outra PMU (referência), onde que, numa janela com tamanho de poucos segundos, entre 2 a 4 segundos, com centro no ponto fornecido pelo HWT. Esse tamanho de janela não deve ser um valor elevado sob pena de um evento anterior qualquer à abertura ser considerado incorretamente como uma abertura.

Para o entendimento, a Figura 3.13 apresenta o gráfico da diferença angular entre as PMUs denominadas UFMT (localizada em Porto-Velho/RO) e UFMT (localizada em Cuiabá/MT) no dia 24 de novembro de 2011, sendo utilizado como referência a PMU UFMT. O ponto vermelho na figura representa a localização fornecida pelo HWT e, observando antes desse ponto a diferença angular era praticamente constante e, após esse ponto, variável.

Finalmente, uma última verificação é realizada antes de dizer que o ponto fornecido representa a abertura da interligação. Essa verificação procura observar se, na janela de observação, após o ponto, há a passagem por $+180^\circ$ ou -180° . A subseção 3.2 explica que o ângulo continua a variar indefinidamente, porém como as medições angulares estão no padrão de -180° a $+180^\circ$, a passagem por um deles comprova a abertura da interligação.

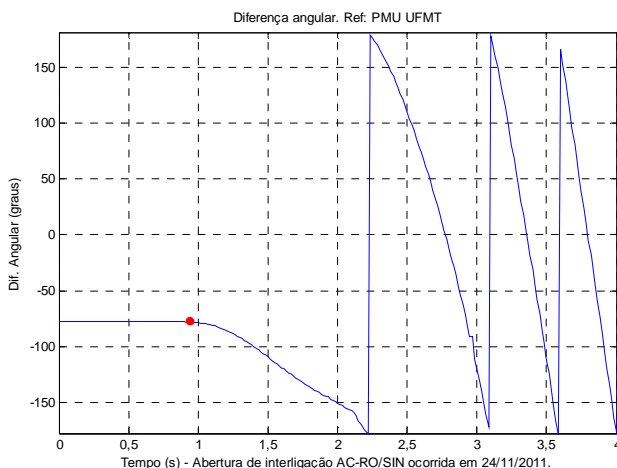


Figura 3.13 – Diferença angular entre UFMT e UNIR em 24/11/2011 durante a abertura da interligação AC-RO/SIN.

3.3.2 Atuação do Esquema de Rejeição de Carga

Com a existência da abertura de interligação e a queda constante do valor da frequência no subsistema ilhado, há a possibilidade da atuação do esquema de rejeição de carga. Para isso, a frequência é monitorada e, ao atingir um patamar de frequência pré-estabelecido (ver seção 4.4.2 para detalhes sobre os diversos ERAC implementados no SIN) atua-se então a rejeição.

A observação efetuada nesses valores consiste em confirmar se o valor da frequência está abaixo da frequência

tabelada para atuar cada estágio do alívio de carga e acima do estágio superior. Essa verificação é necessária, pois em uma suposição de que o HWT não tenha sido capaz de identificar um estágio - por exemplo, ao escolher um valor não coerente de “L” na equação (2.11) - mas identifique o estágio seguinte, a metodologia seja capaz de informar corretamente cada detecção.

Utilizando a mesma ocorrência analisada na abertura de interligação, observa-se a Figura 3.14, que contém o gráfico de frequência obtida pela PMU UNIR. Os pontos em vermelho novamente são os fornecidos pelo HWT. O primeiro ponto corresponde justamente à abertura da interligação analisada anteriormente. O segundo ponto não se encaixa em nenhum dos eventos monitorados pela metodologia, correspondendo então à algum outro evento. Já o terceiro e quarto pontos estão dentro dos patamares para atuação do alívio de carga brasileiro (vide

Tabela 4.5 na subseção 4.4.2), sendo o primeiro desses dois a estar na faixa do 1º estágio e o último na faixa do segundo estágio do ERAC.

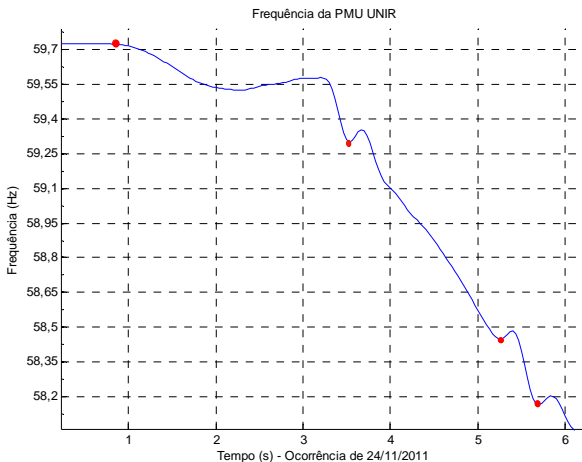


Figura 3.14 – Frequência da PMU UNIR em 24/11/2011

3.3.3 Restabelecimento da Interligação

Uma vez que detectado a abertura da interligação, monitora-se no sinal o provável restabelecimento da interligação. De um modo mais genérico, pode-se dizer que essa verificação é o oposto da verificação da abertura de interligação, pois enquanto que na abertura se observa que a diferença angular (frente a uma referência) passa de constante para variável. No restabelecimento a diferença angular passa de variável para praticamente constante (pois primeiramente há a oscilação eletromecânica do restabelecimento e logo após ainda há variação devido o sistema estar entrando na nova configuração nominal, mas essa variação é pequena).

A observação dos valores da diferença angular antes do ponto fornecido pelo HWT deve ser variável, com passagens por -180° e $+180^\circ$ onde que, após o ponto, poderá apresentar algumas passagens também, porém ela cessa e os valores da diferença angular tendem a ficar constante, conforme já mencionado no parágrafo anterior.

Utilizando mais uma vez o exemplo da ocorrência de 24 de novembro de 2011, com o gráfico da diferença angular entre as PMUs UFMT e UNIR (sendo a referência angular a PMU UFMT) apresentado na Figura 3.15, sendo o ponto vermelho o apontado pelo HWT, é possível observar a variação do ângulo antes do ponto fornecido e essa variação cessou-se após o ponto, tendendo a ficar constante após o transitório eletromecânico.

Ao detectar o restabelecimento da interligação, é executado, a partir do ponto fornecido pelo HWT, a análise do transitório pelo método de Prony com dados de 20 segundos. Detalhes do tempo de dados e o método de Prony são encontrados no trabalho de Jeremias (2012).

A metodologia descrita no presente trabalho foi implementada computacionalmente em Matlab no ambiente de prototipação DFAM (JEREMIAS, 2012).

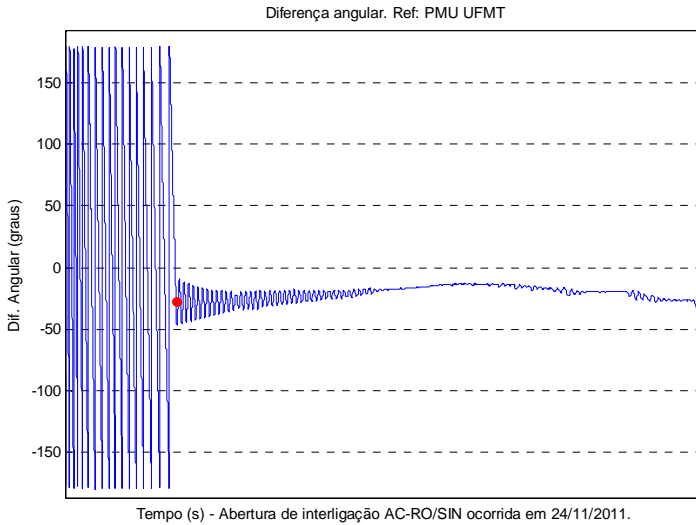


Figura 3.15 – Diferença angular entre UFMT e UNIR em 24/11/2011 durante o restabelecimento da interligação AC-RO/SIN.

3.3.4 DFAM

O DFAM, desenvolvido por Jeremias (2012), é um ambiente computacional construído para servir de base para desenvolvimento e testes de metodologias e prototipação de programas a partir de sincrofasores. Seu nome é referência aos sinais básicos de um SMFS, que são Dados de Frequência, Ângulos e Módulos de tensão e corrente.

O DFAM tem seu desenvolvimento focado em cinco módulos principais de análise, apresentados na

Figura 3.16. Maiores informações podem ser obtidas em (JEREMIAS, 2012).

- Análise em Regime Permanente;
- Análise de Ocorrências;
- Análise de Qualidade de Energia Elétrica;
- Detecção e Identificação de Eventos;
- Análise de Oscilações Eletromecânicas.

Através de uma interface gráfica, esse programa serve como suporte à implementação e testes de metodologias clássicas e novas para processar dados fasoriais.

O DFAM utiliza uma base de aquisição de dados própria, cuja alimentação é feita a partir de consulta ao banco de dados do PDC, feita por outros softwares. No caso do projeto MedFasee (o projeto MedFasee é descrito no item 4.3), são usados o programa MDF ou MedPlot (DECKER *et al*, 2011) desenvolvidos no âmbito do Projeto MedFasee CTEEP e MedFasee BT, respectivamente.

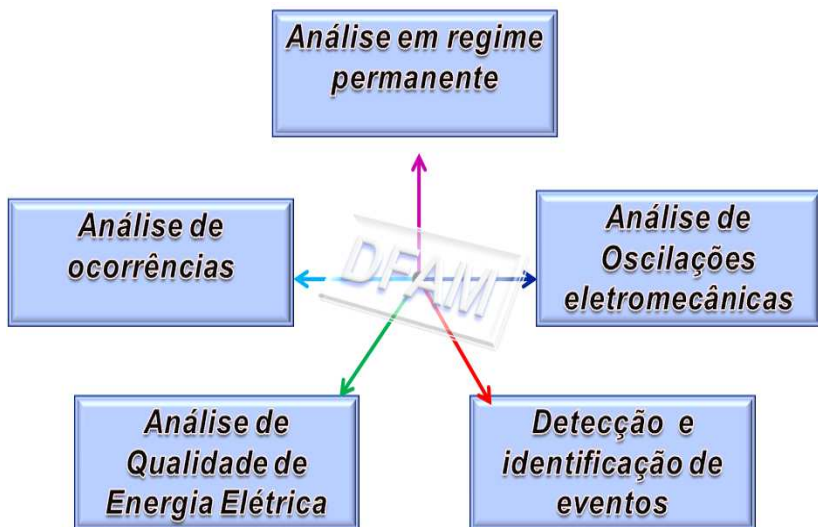


Figura 3.16 – Módulos de análise do DFAM

Na Figura 3.17 apresenta-se a janela principal do DFAM. Os números em destaque nesta figura representam:

[1] *Consultas encontradas* - Histórico de todas as consultas que já foram realizadas no PDC e devidamente carregadas para o DFAM, estando disponíveis para análise.

[2] *Descrição* – Uma breve descrição das consultas com o objetivo de auxiliar o usuário a identificar do que se trata cada consulta.

[3] *Nova consulta* – Responsável por cadastrar as consultas realizadas no PDC via MDF ou MedPlot, adicionando esta nova consulta no acesso ao histórico “Consultas encontradas” [1].

[4] *Carregar* - Cada conjunto de dados gerados fica armazenado em arquivos “.mat” no computador local. Quando se deseja trabalhar com um conjunto de dados, basta selecioná-lo na lista de “Consultas Encontradas” e “Carregar” os dados para que a janela com todas as funcionalidades seja aberta.

[5] *Renomear* - Utilizado para editar informações contidas na busca, como nome e descrição.

[6] *Apagar* - Um conjunto de dados pode ser excluído da lista de “Consultas Encontradas” [1] e, por consequência, apagado do disco através deste botão.

[7] *Ajuda* - Seguindo os padrões de programas comerciais, o item “Ajuda” possui o recurso “Sobre” que apresenta as versões do ambiente e atribui os créditos aos colaboradores.

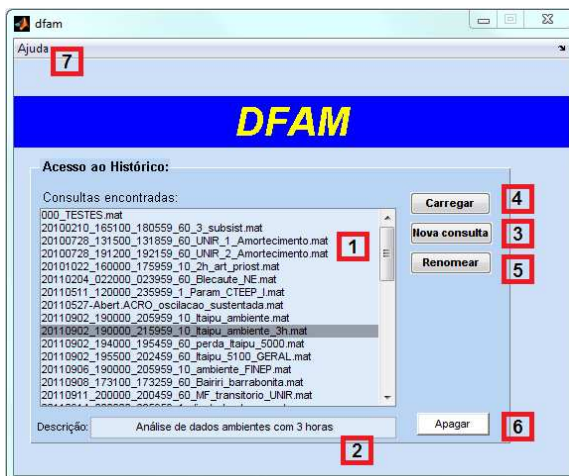


Figura 3.17 – Janela de abertura do DFAM

Ao selecionar uma consulta e carregá-la através do botão “Carregar”, abre-se uma nova janela com as funcionalidades disponíveis. Na Figura 3.18 apresenta-se esta janela e as funcionalidades disponíveis.

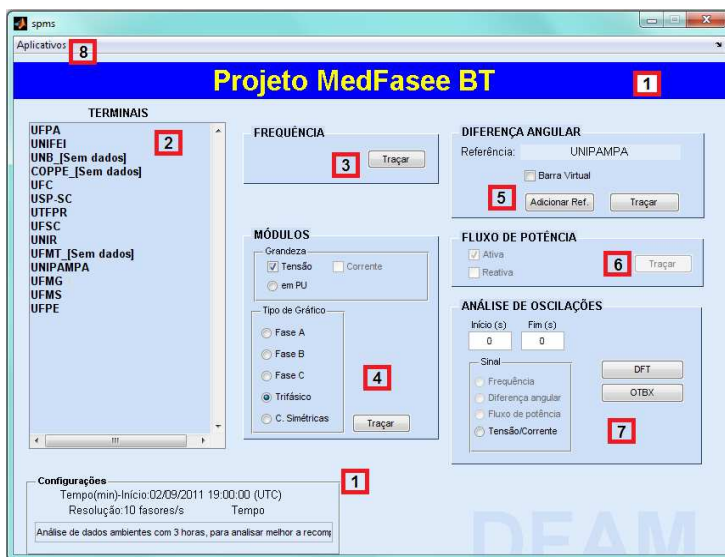


Figura 3.18 – Janela de Funcionalidades - DFAM

Os números em destaque nesta figura representam:

- [1] *Nome do SMFS* - Identificação do SMFS utilizado.
- [2] *Terminais* - São apresentados nessa lista todos os terminais disponíveis do SMFS para seleção.
- [3] *Frequência* – É plotado em uma nova janela o gráfico da frequência da PMU selecionada em [2].
- [4] *Módulos* - Neste conjunto de funcionalidades são traçados os gráficos de tensão e corrente, seja em grandezas trifásicas, seja em componentes simétricas.
- [5] *Diferença angular* - Permite ao usuário observar a diferença angular de sequência positiva entre terminais, podendo ser selecionada a referência angular.

[6] *Fluxo de potência* - Em terminais que possuem medição de corrente, é possível traçar os gráficos de fluxo de potência ativa e reativa.

[7] *Análise de Oscilações* - Nesta funcionalidade, o usuário escolhe o tipo de sinal e o intervalo de tempo que deseja analisar.

[8] *Aplicativos* - A aba “Aplicativos”, apresentada na Figura 3.19, é destinada para alocar os demais desenvolvimentos, tais como o desenvolvido neste trabalho de dissertação, que está escrito como “ERAC – Esquema Reg. De Alívio de Carga”.

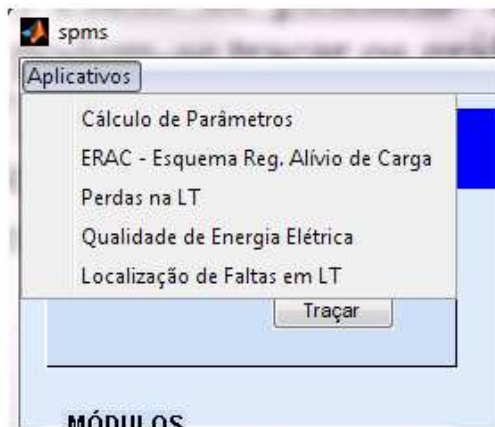


Figura 3.19 – Lista de aplicativos externos - DFAM

3.3.5 Implementação computacional associada à metodologia

Foi desenvolvido um programa em Matlab para aplicar a metodologia proposta. O programa tem como objetivo apresentar de uma forma simples todas as análises realizadas através da metodologia.

Dentre os recursos disponibilizados no programa destacam-se a possibilidade de escolher a *wavelet* a ser

utilizada e de alterar os valores dos ajustes do ERAC através da interface gráfica.

A interface também permite observar o nome, os códigos de identificação e a região elétrica de cada PMU disponível para análise. Além disso, dispõe de menus para facilitar sua utilização.

A Figura 3.20 mostra a interface visual do algoritmo desenvolvido, que está organizada em três principais ambientes:

- Ambiente Dados;
- Ambiente Relatório de Resultados;
- Ambiente Visualização Gráfica.

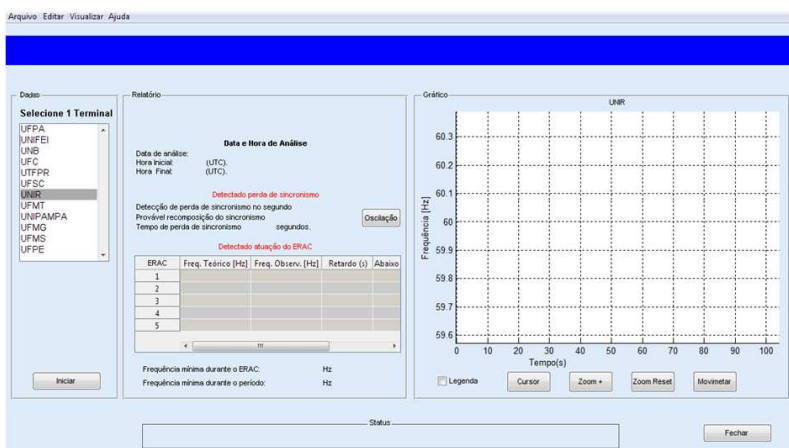


Figura 3.20 – Vista principal do programa.

O ambiente “Dados” fornece uma lista com o nome das PMUs cujos dados estão disponíveis para a análise. Esses dados são fornecidos através de um programa denominado “Medplot” desenvolvido principalmente para adquirir os dados fasoriais provenientes do PDC. O ambiente “Dados” permite que seja selecionado apenas um terminal por análise.

A Figura 3.21 apresenta uma ilustração deste ambiente. Embora no ambiente “Dados” apareçam todas as PMUs

disponíveis, o programa está habilitado para trabalhar somente com um terminal de cada vez.

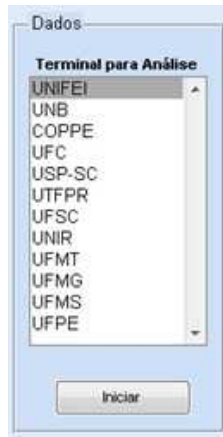


Figura 3.21 – Ambiente “Dados”.

O ambiente “Relatório de Resultados” (Figura 3.22) apresenta as informações do terminal em análise, além dos principais resultados obtidos.

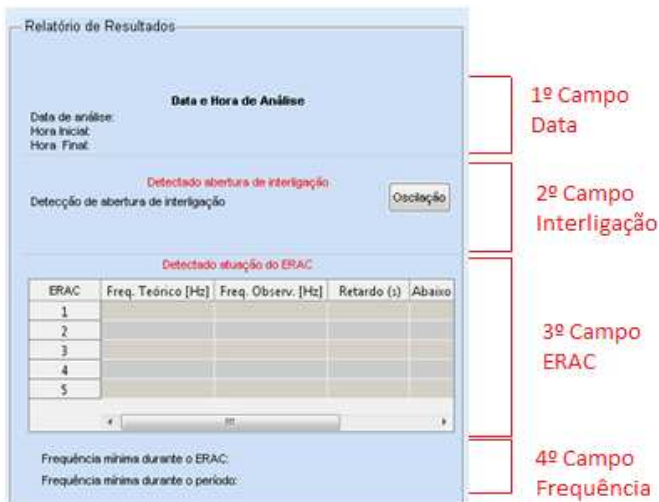


Figura 3.22 – Ambiente “Relatório de Resultados”.

Este ambiente apresenta os valores numéricos de leituras e resultados da análise efetuada do terminal escolhido no ambiente “Dados”.

A parte superior deste ambiente (1º Campo) contém informações tais como o nome do terminal selecionado, a data, o horário inicial e final do conjunto de dados selecionados para estudo.

Como o SMFS utiliza sincronização através do sistema de GPS, os horários de cada amostra são etiquetados com o horário em UTC¹, então o horário apresentado no 1º campo também será em UTC.

A parte central (2º Campo) apresenta informações da abertura e reintegração da interligação, além do botão oscilação, que ao ser pressionado abre uma nova janela apresentando uma análise da oscilação eletromecânica ocorrida da reintegração da interligação utilizando o método Prony monossinal², utilizada no DFAM por Jeremias (2012), mostrado na Figura 3.23.

O 3º campo apresenta uma tabela com os valores de ajuste do alívio de carga brasileiro, os valores correspondentes à sua atuação efetiva sinalizada pelo programa e a diferença entre o instante ajustado e sinalizado, além do período em que a frequência ficou abaixo de cada patamar estabelecido.

A parte inferior (4º campo) indica o valor mínimo de frequência alcançado durante as execuções do ERAC e também o valor mínimo global da frequência alcançada durante toda a análise de dados.

O ambiente “Visualização Gráfica” é responsável por apresentar ao usuário o gráfico do sinal, além de apontar os

¹ UTC – *Universal Time Coordinated* é o fuso horário de referência global onde, a partir dele, se calcula todos as zonas de fuso horário. É sucessor do conhecido GMT (*Greenwich Mean Time*), pois a referência de tempo é atômica enquanto que o GMT utiliza a posição das estrelas como referência.

² Prony monossinal, desenvolvido por Gaspard Riche Baron de Prony. É um dos métodos paramétricos de análise espectral, ainda muito utilizado em muitas áreas, a exemplo de localização de objetos por radar, análise modal de estruturas mecânicas, sistemas de comunicação, identificação paramétricas de sistemas dinâmicos, etc (Santos, 2008).

locais onde se observou a abertura da interligação, os valores teóricos de ajuste de cada estágio do ERAC, a atuação e os valores de cada estágio do ERAC detectados pela metodologia utilizada, a frequência mínima atingida e o instante da reativação da interligação. Para apresentar todos estes índices, o ambiente “Visualização Gráfica” plota apenas o sinal da frequência na PMU selecionada, pois é o gráfico mais indicado para apresentar melhor os indicadores de cada estágio teórico para execução do ERAC, os locais onde efetivamente a metodologia utilizada detectou a atuação de cada estágio individualmente, e também mostrar o tempo em que a frequência excursionou abaixo de cada patamar do ERAC.



Figura 3.23 – Análise da oscilação eletromecânica pelo método de Prony.

O programa é composto por menus que contêm informações para seu próprio funcionamento ou alguma execução auxiliar. O menu é subdividido em:

- Arquivo;
- Editar;
- Visualizar;
- Ajuda.

A Figura 3.24 apresenta o fluxograma dos menus do programa.

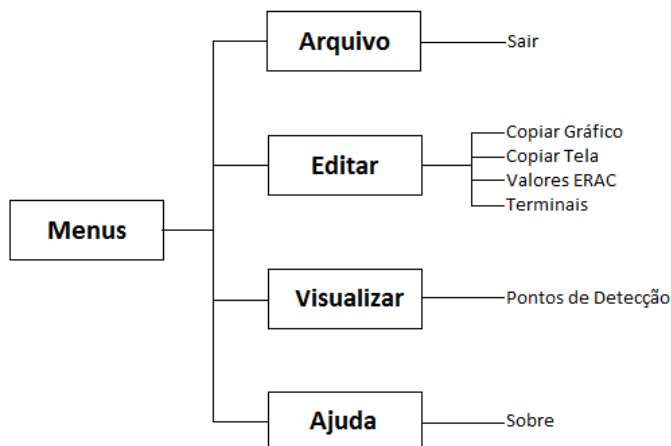


Figura 3.24 – Estrutura dos Menus.

O menu “Arquivo” possui apenas o submenu “Sair”, que finaliza o programa. O menu “Editar” possui quatro submenus:

1. “Copiar tela”, responsável por colocar na área de transferência do computador uma imagem do programa, semelhante ao submenu “Copiar gráfico”;
2. “Copiar gráfico”, onde apenas copia para a área de transferência o gráfico plotado pelo programa no ambiente “Visualização Gráfica”;
3. “Valores ERAC”, local onde são armazenados os valores do alívio de carga brasileiro de todas as suas regiões elétricas. A
4. Figura 3.25 contém a tela onde são apresentados os valores de ajuste. É possível alterar esses valores na própria tela;

5. “Terminais”, que apresenta uma lista das PMUs instaladas, com seus respectivos IDs (número identificador) e suas localizações físicas (região geográfica do país). É possível adicionar novas PMUs em caso de ampliação do sistema ou apagar uma PMU já cadastrada no banco de dados. A Figura 3.26 mostra a vista desta janela.

Ajustes - ERAC

SUL

Estágio	Ajuste (Hz)	Carga Rej (%)
Estágio 1	56.50	7.50
Estágio 2	56.20	7.50
Estágio 3	57.90	10.00
Estágio 4	57.60	15.00
Estágio 5	57.30	15.00

ACRE-RONDÔNIA

Estágio	Ajuste (Hz)	Carga Rej (%)
Estágio 1	58.50	15.00
Estágio 2	58.20	10.00
Estágio 3	57.90	10.00
Estágio 4	57.70	10.00
Estágio 5	57.50	10.00

SUDESTE

Estágio	Ajuste (Hz)	Carga Rej (%)
Estágio 1	58.50	7.00
Estágio 2	58.20	7.00
Estágio 3	57.90	7.00
Estágio 4	57.70	7.00
Estágio 5	57.50	7.00

CENTRO-OESTE

Estágio	Ajuste (Hz)	Carga Rej (%)
Estágio 1	58.50	7.00
Estágio 2	58.20	7.00
Estágio 3	57.90	7.00
Estágio 4	57.70	7.00
Estágio 5	57.50	7.00

NORTE

	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
Inst ¹ (Hz)	57.40	57.10	57.00
Carga Rej ¹ (%)	8.00	7.00	11.00
Hz ²	1.50	2.90	3.90
Inst ¹ (Hz)	57.00	56.50	56.00
Carga Rej ¹ (%)	19.1C	39.1C	29.1C
Hz ²	1.50	2.90	3.90

1- Cimar, Caba, Cabna
2- Abria, Aumar

NORDESTE

	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 4	Est. 5
Inst ¹ (Hz)	57.30	57.20	57.10	56.80	56.50
Temp ¹ (Hz)	58.50	58.50	58.50	-	-
Temp ¹ (s)	10.00	11.00	12.00	-	-
Hz ²	0.70	1.10	1.50	1.70	1.90
Carga Rej ¹ (%)	6.00	7.00	11.00	8.00	8.00
Inst ¹ (Hz)	57.40	57.10	57.00	56.80	56.50
Temp ¹ (Hz)	58.50	58.50	58.50	-	-
Temp ¹ (s)	10.00	11.00	12.00	-	-
Hz ²	0.70	1.10	1.50	1.70	1.90
Carga Rej ¹ (%)	6.00	7.00	11.00	8.00	8.00

1- Cabela, Caba, Energia, Botorema (Ceb), Energia SE, Coelma, Energia PE (Saxja), Cosm, Sulga
2- Capica, Sobra (Carga Da Coelma que possui quota contorne Area 97)

Ok Cancelar

Figura 3.25 – Valores do ERAC.

Terminais Pmu's

PMUs

ID	PMU	Região
2	UFPA	Norte
3	UNFEI	Sudeste
4	UNB	Centro-Oeste
5	COPPE	Sudeste
6	UFC	Nordeste
7	USP-SC	Sudeste
8	UTFFR	Sul
9	UFSC	Sul
10	UNIR	Acree-Rondônia
11	UFMT	Centro-Oeste
12	UNIPANPA	Sul

Adicionar / Remover

Adicionar PMU Remover PMU

Salvar Desfazer

Figura 3.26 – Cadastro de PMUs.

O menu “Visualizar” possui apenas o item “Pontos de detecção”, que é habilitado apenas após uma execução (análise de um terminal no ambiente “Dados”) do programa. Esse item mostra no gráfico do sinal os pontos onde a saída do HWT não foi nula. A Figura 3.27 apresenta um exemplo de uso, onde os pontos em vermelho apontam as detecções efetuadas pelo programa.

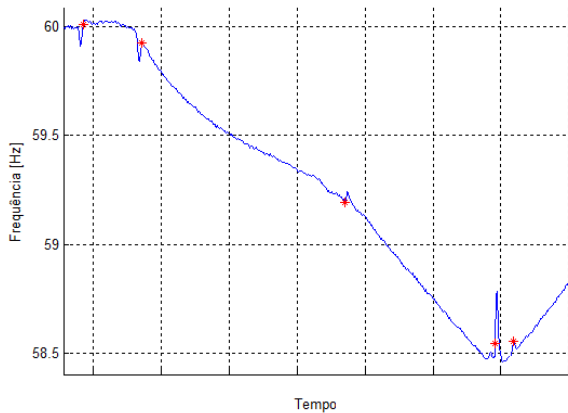


Figura 3.27 – Pontos de detecção.

O menu “Ajuda” apresenta informações sobre o desenvolvimento do programa.

4 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta as análises e os resultados obtidos através da metodologia proposta implementada no programa desenvolvido.

Primeiramente é descrito o SIN e, em seguida, é apresentado o SMFS MedFasee-BT. Logo após detalha-se um dos eventos mais explorados nas análises deilhamento realizados neste trabalho, o esquema de rejeição de carga brasileiro, denominado Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC), apresentando primeiramente seus conceitos e, em seguida, descrevendo o ERAC brasileiro.

Então são apresentadas e detalhadas duas análises. A primeira trata de uma ocorrência onde há o envolvimento de abertura da interligação Acre-Rondônia/SIN além da atuação do primeiro estágio do ERAC. Com a finalidade de explicitar ao máximo todas as etapas, são colocados gráficos dos fasores das seguintes naturezas elétricas: tensão, frequência e diferença angular entre as diferentes PMUs. Na segunda análise explorada também há a abertura da interligação Acre-Rondônia/SIN, a atuação de quatro estágios do ERAC e, em seguida, o restabelecimento da interligação com o SIN.

Neste capítulo, para evitar repetições de termos, em vez de ser mencionada uma PMU que está instalada em uma universidade e que pertence a uma região elétrica brasileira (vide item 4.3), será apenas mencionado o nome da universidade, em referência a PMU nela instalada.

4.2 Sistema Interligado Nacional

Os parágrafos seguintes descrevem um breve histórico do Sistema Elétrico Brasileiro, chegando até os dias atuais com o a interligação dos subsistemas.

A História do setor elétrico no Brasil tem como marco inicial o ano de 1879, quando foi inaugurada a iluminação elétrica na estação central da ferrovia Dom Pedro II (conhecida como Central do Brasil) no estado do Rio de Janeiro. A geração da eletricidade era realizada através de um dínamo.

Já a primeira central geradora foi inaugurada no Brasil no ano de 1883, na cidade de Campos, estado do Rio de Janeiro. Essa central geradora era uma unidade termelétrica com capacidade de 52 kW e a fonte primária de geração era lenha. Essa central foi utilizada para alimentar 39 lâmpadas na cidade.

Desde as primeiras centrais geradoras até a década de 1960 (antes do período de interligações), o sistema era, na sua maioria, privado e isolado. Esse sistema atendia apenas regiões onde havia concentração de renda e consumo.

Até então, investimentos para universalizar a energia elétrica não faziam parte dos planos das empresas privadas dominantes do sistema elétrico (GOMES *et al*, 2012). O início da implantação das interligações do sistema foi marcado pela entrada em operação da hidrelétrica de Furnas em 1963, que interconectou os sistemas de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Houve ainda outras conexões, tal como a interligação das usinas de Ilha Solteira e Jupuíá ao Sudeste. A flexibilidade do sistema interligado permite, inclusive, que o aumento da demanda ocorra antes do aumento da oferta, pelo fato desse sistema poder ser caracterizado como uma grande reserva hídrica.

A interligação elétrica entre subsistemas de diferentes características, mas que têm predomínio de geração hidrelétrica, ajuda a dar maior flexibilidade nos intercâmbios, pois pode-se tirar proveito das diferentes condições climáticas, fazendo-se melhor uso dos períodos de chuva e seca de cada região.

No Sistema Interligado Nacional atual, mostrado na Figura 4.1 com o horizonte de 2012 (fonte: ONS), é possível observar as principais linhas de transmissão (de interligação e

regionais) de tensões mais elevadas do Brasil. Esse sistema, de grande porte, possui forte predominância de usinas hidrelétricas. O sistema opera de forma interligada, beneficiando-se da capacidade de atender diversas regiões geográficas e, principalmente, da possibilidade de haver troca de energia entre essas regiões, além de permitir aproveitar os recursos energéticos existentes no país.

A Tabela 4.1 (fonte: ONS) contempla as principais características do SIN enquanto que a Figura 4.2 apresenta a contribuição de cada tipo de fonte geradora de eletricidade da capacidade instalada na geração no Brasil.

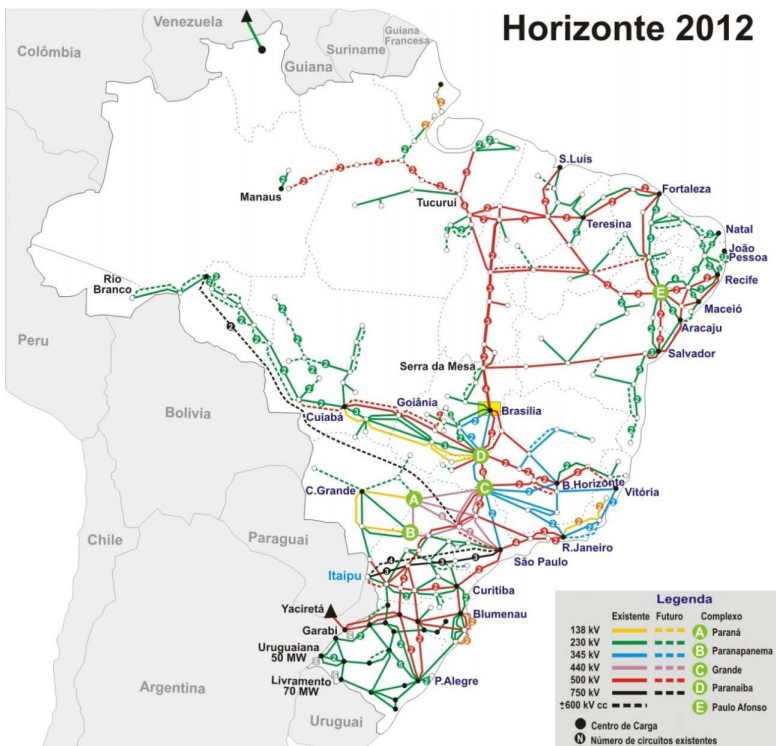


Figura 4.1 – Sistema Interligado Nacional (fonte: ONS).

Tabela 4.1 – Características do SIN.

Capacidade de Geração Instalada	105.343 MW
Pico de Demanda	76.845 MW (atingida em Fevereiro/2013)
Níveis de Tensão Utilizados na Transmissão	230 kV 345 kV 440 kV 500 kV 600 kV 750 kV
Fontes de Geração	Hidroelétrica – 70.001 MW Itaipu (60 Hz) – 7.000 MW PCHs – 4.515 MW Termoelétricas - 16.228 MW Termonuclear – 2.007 MW Eólica – 1.342 MW Biomassa – 4.250 MW

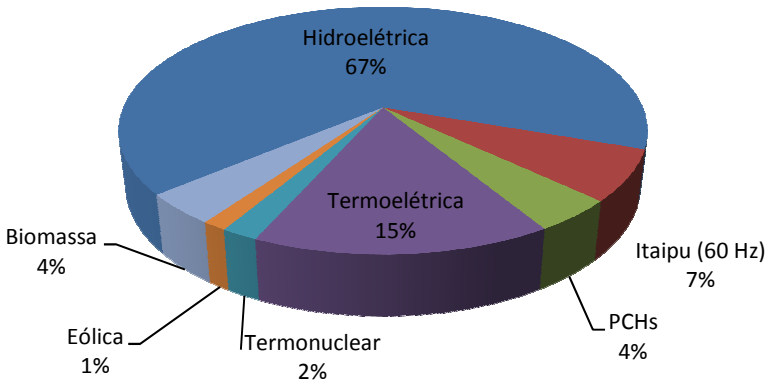


Figura 4.2 – Fontes geradoras de eletricidade no Brasil.

Sob o ponto de vista elétrico, o SIN é dividido em cinco subsistemas, a saber:

- **Sul (S)** – abrange os três estados do Sul e o estado do Mato Grosso do Sul (MS);

- **Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO)** – abrange os estados do Sudeste e Centro-Oeste, com exceção do MS que está associado ao subsistema Sul;
- **Nordeste (NE)** – abrange os estados do Nordeste do país, com exceção de Maranhão (MA), que está associado ao subsistema Norte;
- **Norte (N)** – abrange os estados do Pará (PA), Tocantins (TO) e Maranhão;
- **Acre-Rondônia (AC-RO)** – abrange os estados do Acre (AC) e Rondônia (RO).

4.2.1 Sistema Acre-Rondônia

O Sistema Acre-Rondônia faz parte do Sistema Interligado Nacional (SIN) desde o dia 23 de outubro de 2009, com a entrada em operação da linha Jauru-Vilhena, circuito duplo com aproximadamente 350 km de extensão em 230 kV.

No primeiro dia útil após a interconexão (26 de outubro de 2009), com uma carga de 442 MW médios, foram recebidos do subsistema Sudeste cerca de 156 MW médios de energia. Com isso houve a diminuição da geração termoelétrica, ocasionando a redução de emissão de gás carbônico (CO₂) e, conseqüentemente, gerando economia devido a não queima do óleo que seria utilizado (ONS, 2011).

Naquele ano (2009), o sistema contava com circuitos duplos de 230 kV apenas nos segmentos de Samuel/Porto Velho e Jauru/Vilhena e com capacidade de geração de 834,35 MW, decorrentes das usinas de Samuel, Termonorte I e II e as três usinas do parque térmico Rio Acre (ELETRONORTE, 2013). A Figura 4.3 mostra o sistema Acre-Rondônia no início da interligação.

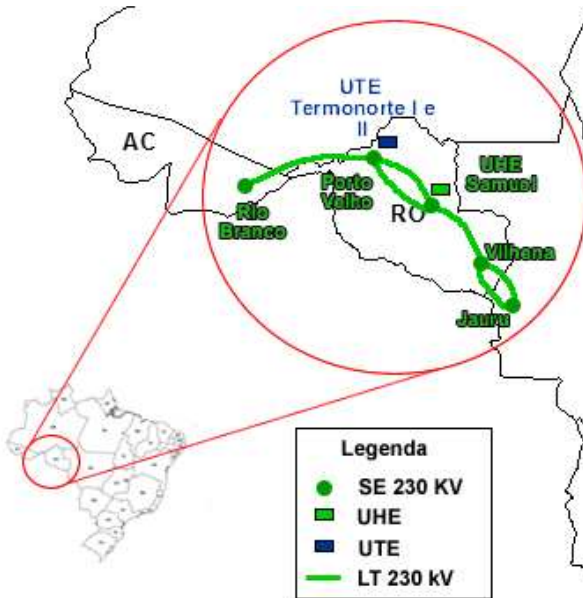


Figura 4.3 – Sistema Acre-Rondônia.

Desde março de 2012, na subestação em Porto Velho/RO (denominada Subestação Coletora Porto Velho), está em operação um transformador de 465 MVA (500/230 kV) de modo a permitir a operação comercial das primeiras unidades da usina hidrelétrica Santo Antônio.

No final do ano de 2012 foi colocado em operação na SE Coletora o sistema *Capacitor Commutated Converter Back-to-Back* – CCC - (2 x 400 MW), mostrado na Figura 4.5.

Atualmente, o sistema Acre-Rondônia conta com 95 MW gerados no Acre através das três usinas do Parque Térmico do Rio Branco, 523,35 MW provenientes das usinas termelétricas Termonorte I e II, 216 MW da usina hidrelétrica Samuel e 11 unidades da usina hidrelétrica Santo Antônio no estado de Rondônia (ELETRONORTE, 2013).

Na ampliação do sistema Acre-Rondônia, haverá o início de operação da usina hidrelétrica Jirau, que conta com 50 unidades geradoras de 75 MW cada, totalizando 3.750 MW de

capacidade de geração instalada e a operação de todas as unidades da UHE Santo Antônio, que terá capacidade instalada de 3.150 MW (GOMES *et al*, 2011). Com a operação dessas duas usinas o sistema Acre-Rondônia contará com aproximadamente 7.280 MW de capacidade de geração instalada, que será escoada através da SE coletora Porto velho, que será conectada ao AC-RO através do sistema *Back-to-Back* sem a utilização do transformador de 465 MW atualmente em operação. A Figura 4.4 apresenta essa configuração final no horizonte de 2014, adaptado de Silva *et al* (2013).

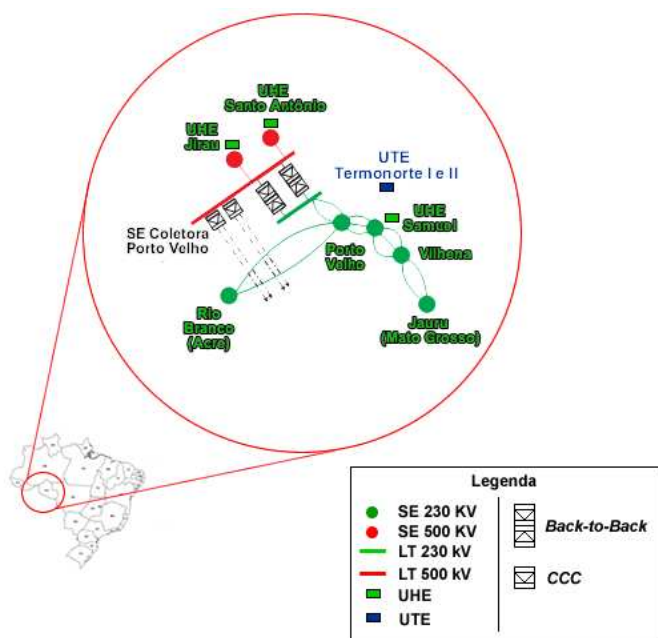


Figura 4.4 – Configuração do Sistema no Horizonte 2014.

Como a maior parte da energia proveniente das UHEs de Jirau e Santo Antônio será direcionada à região Sudeste, haverá duas linhas de transmissão de ± 600 kV, 3150 MW para cada uma com 2350 km de extensão, interligando as subestações Coletora de Porto Velho e Araraquara (GOMES *et al*, 2011).



Figura 4.5 – *Capacitor Commutated Converter Back-to-Back.*

O sistema Acre-Rondônia é utilizado como exemplo para a aplicação da metodologia proposta nesse trabalho. Os dados para análise das ocorrências são provenientes do Sistema

Nacional de Medição Fasorial Sincronizada em Baixa Tensão (MedFasee-BT).

4.3 Projeto MedFasee-BT

Resultado da parceria entre a UFSC, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Agência Brasileira da Inovação (FINEP) e Reason Tecnologia, no âmbito do projeto MedFasee e no ano de 2003, iniciou-se o projeto para realizar estudos do SMFS cujos objetivos contemplam o estudo, o desenvolvimento e a difusão dessa tecnologia para aplicações na monitoração e controle de SEEs (DECKER *et al.*, 2006).

O sistema criado entrou em operação em 2004, quando foram instaladas três PMUs, uma em cada capital de cada estado da região Sul do Brasil e o concentrador de dados (PDC) foi instalado em Florianópolis - SC. As PMUs foram instaladas na rede de baixa tensão (127 ou 220 volts, dependendo do local) e adquiriam fasores de tensão com uma taxa de 60 fasores por segundo.

O sistema de aquisição de dados é equipado com uma estrutura hierárquica de PDCs (FÜRSTENBERGER, 2010) desenvolvida também no âmbito do projeto e instalado no Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LabPlan) na Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis. Já a comunicação de dados empregada é a internet, onde o tráfego é realizado por meio de Redes Privadas Virtuais – VPN (do inglês *Virtual Private Network*) entre as PMUs e o PDCs (JEREMIAS *et al.*, 2012).

Em 2008 o número de PMUs do projeto foi expandido para 09 PMUs instaladas, cobrindo então todas as regiões geográficas do Brasil, tendo como objetivo estudar e monitorar o comportamento dinâmico do SIN.

Atualmente, o protótipo de baixa tensão que monitora o SIN conta com 22 PMUs instaladas próximo aos centros de

carga e abrangendo todas as regiões geelétricas do país. A Figura 4.6 mostra o estado atual dessas instalações e indica o local onde cada PMU está instalada, sendo:

- **UFAM** – Universidade Federal do Amazonas (Manaus/AM);
- **UNIFAP** – Universidade Federal do Amapá (Macapá/AP);
- **UFPA** – Universidade Federal do Pará (Belém/PA);
- **UFT** – Universidade Federal do Tocantins (Palmas/TO);
- **UFMA** – Universidade Federal do Maranhão (São Luís/MA);
- **UFC** – Universidade Federal do Ceará (Fortaleza/CE);
- **UFPE** – Universidade Federal do Pernambuco (Recife/PE).
- **UFBA** – Universidade Federal da Bahia (Salvador/BA).
- **UnB** – Universidade de Brasília (Brasília/DF);
- **UFMG** – Universidade Federal de Minas Gerais (Belo Horizonte/MG);

-
- **UFJF** – Universidade Federal de Juiz de Fora (Juiz de Fora/MG).
 - **UNIFEI** – Universidade Federal de Itajubá (Itajubá/MG);
 - **COPPE/UFRJ** – Universidade Federal do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro/RJ);
 - **USP-SC** – Universidade de São Paulo, Núcleo São Carlos (São Carlos/SP);
 - **UFSC** – Universidade Federal de Santa Catarina (Florianópolis/ SC);
 - **UFGRS** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/ RS);
 - **UNIPAMPA** – Universidade Federal dos Pampas (Alegrete/ RS);
 - **UTFPR** – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Curitiba/PR);
 - **UFMS** – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (Campo Grande/MS);
 - **UFMT** – Universidade Federal do Mato Grosso (Cuiabá/MT);
 - **UNIR** – Universidade Federal de Rondônia (Porto Velho/RO);
 - **UFAC** – Universidade Federal do Acre (Rio Branco/AC);

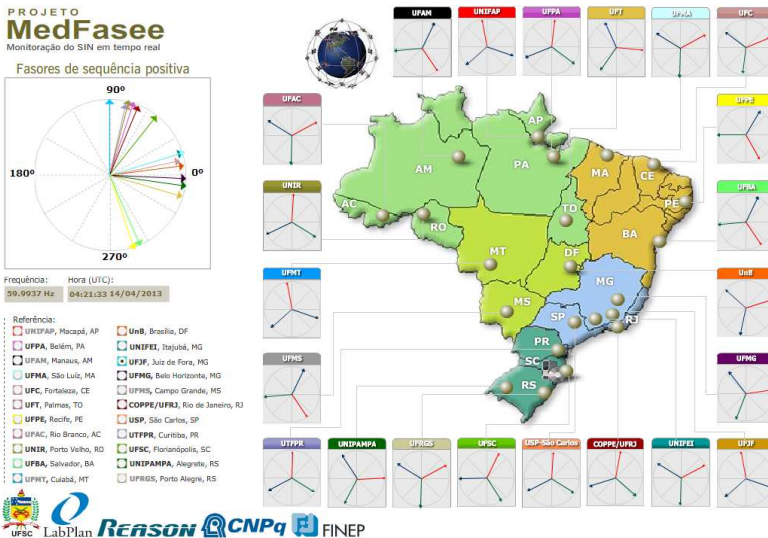


Figura 4.6 – Estrutura atual do monitoramento do SIN.

A partir deste SFMS, foram desenvolvidos aplicativos que acessam o PDC tanto para monitoração *on-line* quanto análises *off-line*. Estes programas possuem finalidades distintas, tais como apresentar graficamente a situação atual dos fasores, apresentar a oscilação eletromecânica do sistema ou de um subsistema, monitorar a diferença angular entre PMUs, fazer análises de qualidade de energia, apresentar graficamente alguma variável mensurada durante um período especificado, etc (JEREMIAS *et al*, 2012).

4.4 Esquema de Alívio de Carga

Quando há uma contingência como a perda de geração ou a existência de ilhamento devido à abertura de uma interligação da transmissão, ocorre a perda do equilíbrio geração-carga, o que pode levar o valor da frequência do sistema para fora da faixa aceitável.

A partir do início da década de 1960, os centros de controle do sistema elétrico passaram a agregar as funções de controle automático de geração (CAG) e de controle supervisorio do sistema. O CAG controla a geração das principais usinas, com a finalidade de manter a faixa de frequência do sistema aproximadamente constante em torno do valor nominal, assim como controlar o fluxo nas linhas de interligação do sistema.

Entretanto, caso ainda haja insuficiência de geração, a frequência do sistema tenderá a sofrer decaimento, e isso causará sérios danos ao sistema elétrico, bem como aos equipamentos que nele se encontram.

Para evitar a abrupta queda de frequência e manter a estabilidade do sistema, o esquema de alívio de carga possui como principal característica desligar uma quantidade apropriada de carga para restaurar a frequência a valores nominais de operação em torno do valor nominal. A atuação do esquema de alívio de carga tende a forçar o sistema perturbado a entrar em um novo estado de equilíbrio (ZIN *et al*, 2004).

Os tipos mais comuns de alívio de carga são os esquemas de subfrequência (*Under Frequency Load Shedding* - UFLS), que envolvem o desligamento de cargas predeterminadas quando a frequência atinge níveis também predeterminados (para um UFLS estático). O objetivo principal de um esquema de alívio de carga efetivo é desligar a menor quantidade de carga possível o mais rápido possível para restabelecer o equilíbrio do sistema. (VIEIRA *et al*, 2008).

4.4.1 Classificações dos Esquemas de Alívio de Carga

O esquema de alívio de carga pode ser classificado em dois tipos:

- Estático (ou fixo);
- Dinâmico (ou adaptativo).

O esquema estático desconecta uma quantidade de carga predeterminada em cada estágio de atuação, enquanto que no dinâmico a quantidade de carga a ser desconectada é variável dependendo do grau (severidade) do distúrbio em cada estágio. Embora o esquema dinâmico seja mais vantajoso e flexível, a maioria dos esquemas de alívio de carga pelo mundo é do tipo estático (ONS, 2011).

Alguns tipos de esquemas de alívio de carga dinâmico são (VIEIRA *et al*, 2008):

- Taxa de variação de frequência (df/dt);
- Adaptativo UFLS utilizando informação de variação de frequência e tensão;
- UFLS dinâmico com ajuste do percentual de carga alimentado a ser rejeitado;
- Esquemas de UFLS otimizados;

O esquema por taxa de frequência utiliza o valor da variação de frequência df/dt como entrada para a tomada de decisão. No Brasil, somente na região Nordeste é utilizado o esquema por taxa de variação de frequência e os ajustes de valores desse esquema são determinados pelo ONS.

Pesquisadores tais como Bevrani *et al* (2010) sugerem algumas estratégias de controle de emergência do sistema de potência. Na proposta são utilizadas medições tanto de frequência como de tensão e cria-se uma nova ferramenta observando-se as características e comportamento de ambas as medições, propondo um alívio de carga adaptativo.

Mesmo utilizando-se o alívio de carga estático, a quantidade de carga desligada deve ser apropriada para rapidamente recuperar a frequência do sistema para um valor em torno da nominal, forçando o sistema após a perturbação a atingir um novo valor de equilíbrio (OMAR *et al*, 2010).

4.4.2 Esquema de Alívio de Carga no Brasil

O Esquema de Alívio de Carga no Brasil (ERAC) é definido no submódulo 11.4 dos Procedimentos de rede do ONS, que estabelece também diretrizes para definição de esquemas especiais (ONS, 2011). As Tabelas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 mostram os parâmetros de ajustes atuais do ERAC para as regiões Sudeste, Centro-Oeste, Norte/Nordeste, Sul e Acre-Rondônia, respectivamente (fonte: ONS).

Tabela 4.2 – Ajustes do ERAC para a região Sudeste.

Sudeste		
Estágio	Ajuste (Hz)	Carga Rejeitada (%)
1°	58,5	7
2°	58,2	7
3°	57,9	7
4°	57,7	7
5°	57,5	7

Tabela 4.3 – Ajustes do ERAC para a região Centro-Oeste.

Centro-Oeste		
Estágio	Ajuste (Hz)	Carga Rejeitada (%)
1°	58,5	7
2°	58,2	7
3°	57,9	7
4°	57,7	7
5°	57,5	7

Tabela 4.4 – Ajustes do ERAC para a região Sul.

Sul		
Estágio	Ajuste (Hz)	Carga Rejeitada (%)
1°	58,5	7,5
2°	58,2	7,5
3°	57,9	10
4°	57,6	15
5°	57,3	15

Tabela 4.5 – Ajustes do ERAC para a região Acre-Rondônia.

Acre-Rondônia		
Estágio	Ajuste (Hz)	Carga Rejeitada (%)
1°	58,5	15
2°	58,2	10
3°	57,9	10
4°	57,7	10
5°	57,5	10

Tabela 4.6 – Ajustes do ERAC para a região Norte/Nordeste.

EMPRESAS	EST.	AJUSTE (Hz/s)	Retaguarda (Freq. Abs)		CORTE DE CARGA (%)
			INSTANTÂNEO (Hz)	TEMPORIZADO	
COELBA CELPE ENERGISA BORBOREMA CELB ENERGISA-SE COELCE ENERGISA-PB SAELPA COSERN SULGIPE	1°	0,7	57,3	58,5 (10s)	6
	2°	1,1	57,2	58,5 (11s)	7
	3°	1,5	57,1	58,5 (12 s)	11
	4°	1,7	56,8	-	8
	5°	1,9	56,5	-	8
CEPISA, SOBRAL (Carga da COELCE)	1°	0,7	57,4	58,5 (10s)	6
	2°	1,1	57,1	58,5 (11s)	7
	3°	1,5	57,0	58,5 (12 s)	11
	4°	1,7	56,8	-	8
	5°	1,9	56,5	-	8
CEMAR, CELPA, CELTINS	1°	1,5	57,4	-	6
	2°	2,5	57,1	-	7
	3°	3,5	57,0	-	11
ALBRÁS, ALUMAR	1°	1,5	57,0	-	
	2°	2,5	56,5	-	
	3°	3,5	56,0	-	

4.5 Padronizações Utilizadas

Este item aborda três padronizações utilizadas neste trabalho: a escolha da *wavelet* aplicada na metodologia, o parâmetro definido no HWT para obtenção dos pontos nos quais serão realizadas as análises e a padronização de símbolos e cores do ambiente visualização gráfica.

4.5.1 Wavelet Utilizada

Conforme discorrido na subseção 2.5.4, há muitas *wavelets* existentes e disponíveis para utilização. Para a realização da TWD neste trabalho, foram realizados testes com diferentes *wavelets*, principalmente as da família Daubechies, desde a primeira Db1 (que também é a *wavelet* de Haar) até a Db16. Um grande número de trabalhos voltados em sistemas de energia elétrica, nas suas análises, optaram por utilizar a *wavelet* Db4, como exemplos há os trabalhos de Faria (1997), Mendes (2005) e Cruz (2010).

A Tabela 4.7 mostra ocorrências da interligação Acre-Rondônia/SIN utilizadas para os estudos da escolha da *wavelet*.

Tabela 4.7 – Datas de Ocorrência de Ilhamentos Acre-Rondônia.

Datas de Ocorrência de Ilhamento Acre-Rondônia
27/05/2011
12/06/2011
22/09/2011
13/11/2011
15/11/2011
24/11/2011
30/11/2011
10/12/2011
18/01/2012
15/10/2012

Como a interligação Acre-Rondônia com o SIN é a mais recente e por ainda ser praticamente radial, ocorreram diversos

casos de ilhamento que contribuíram para o estudo e escolha da *wavelet* a ser utilizada neste trabalho.

Todas as *wavelets* testadas (Haar, família Daubechies, chapéu mexicano) apresentaram resultados satisfatórios na detecção, entretanto a Db4 apresentou uma melhor precisão temporal durante as detecções, seguindo a tendência e conformidade dos trabalhos mencionados anteriormente.

4.5.2 Parâmetro da HWT

As escolhas dos pontos de detecção são realizadas através do Hard *Wavelet* Threshold, descrito na subseção 2.6. O valor L determinado para ser usado na equação (2.11) foi de 0,2, ou seja, 20% do maior valor encontrado no coeficiente de detalhamento.

Os maiores valores encontrados no coeficiente de detalhamento ocorrem quando há perda de interligação e restauração da interligação (quando o sinal de entrada analisado é a frequência do sistema).

Quando há ocorrências de alívio de carga (qualquer um dos estágios) o valor apresentado pelo coeficiente de detalhamento é muito menor comparado aos valores de perda e restabelecimento de interligação, e testando valores possíveis em diferentes casos para L , um valor coerente encontrado foi de 0,2.

4.5.3 Padronização de Símbolos e Cores

A padronização de símbolos e cores adotada para representar os resultados obtidos são:

- a) Os dados sinal de entrada são plotados na cor azul;
- b) Marcações para atuação teórica do ERAC são feitas com o símbolo asterisco, sendo):

- O estágio 1 na cor verde (*);
 - O estágio 2 na cor vermelha (*);
 - O estágio 3 na cor azul claro (*);
 - O estágio 4 na cor rosa (*);
 - O estágio 5 na cor amarela (*);
- c) Sempre que o valor do sinal ficar abaixo de pelo menos um valor dos parâmetros de ajuste para atuação do ERAC (chamados aqui de estágio teórico), uma linha horizontal é desenhada para observar o tempo em que a frequência esteve abaixo deste patamar:
- Abaixo do valor do 1º estágio teórico é marcado com a cor verde;
 - Abaixo do valor do 2º estágio teórico é marcado com a cor vermelha;
 - Abaixo do valor do 3º estágio teórico é marcado com a cor azul claro;
 - Abaixo do valor do 4º estágio teórico é marcado com a cor rosa;
 - Abaixo do valor do 5º estágio teórico é marcado com a cor amarelo;
- d) Marcações para detecção de atuação do ERAC são feitas utilizando o símbolo estrela, sendo:
- O estágio 1 da cor verde (☆);
 - O estágio 2 da cor vermelha (☆);
 - O estágio 3 da cor azul claro (☆);
 - O estágio 4 da cor rosa (☆);
 - O estágio 5 da cor amarelo (☆);
- e) Marcação da frequência mínima durante as atuações do ERAC são feitas utilizando um círculo da cor vermelha (○);

- f) Marcação da frequência mínima ocorrida durante toda a extensão do sinal é marcada utilizando um círculo da cor verde (○);
- g) A detecção da perda da interligação é marcada por um triângulo invertido e da cor preta (▼);
- h) A retomada da interligação é marcada por um triângulo invertido em rosa (▼);

Para demonstrar como esses símbolos aparecem no ambiente “Visualização Gráfica”, apresenta-se um exemplo na Figura 4.7, que representa um sinal de frequência de uma PMU hipotética e, que durante uma ocorrência (também hipotética) houve eventos de ERAC, chegando até o 4º estágio.

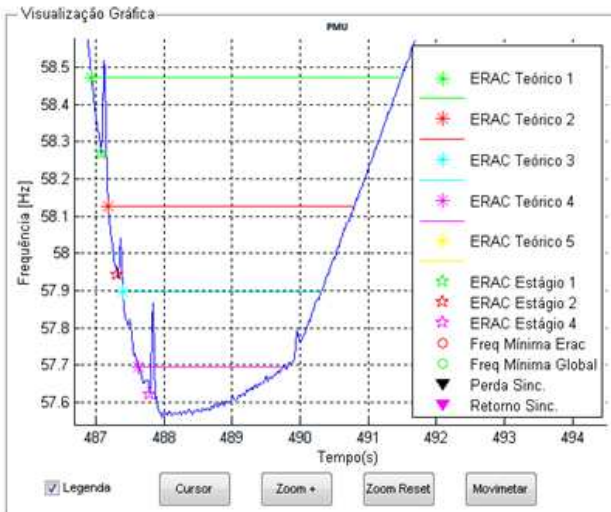


Figura 4.7 – Exemplo da padronização de cores e símbolos adotada.

Através dessas padronizações, apresenta-se então dois casos de estudos para comparar a eficácia da metodologia proposta através de ocorrências reais na interligação Acre-Rondônia/Sin.

4.5.4 Padronização de Horários

O SMFS utiliza como sincronização o sistema de GPS, sendo que os horários recebidos pelos sincrofadores são em UTC. Nesse sentido, para evitar possíveis confusões de fusos-horário (já que o território brasileiro abrange mais de um fuso-horário), todos os horários mencionados nos casos de estudos estão em UTC.

4.6 Caso de Estudo I – Ocorrência de 12/06/2011

4.6.1 Descrição da Ocorrência

A ocorrência analisada neste item aconteceu em 12 de junho de 2011. Nesse dia, às 04h45min houve o desligamento automático das Linhas de Transmissão de 230 kV Samuel/Ariquemes e às 04h54min houve o desligamento automático das Linhas de 230 kV Ariquemes/Ji-Paraná/Pimenta - Bueno/Vilhena. A localização destes eventos pode ser observada na Figura 4.8.

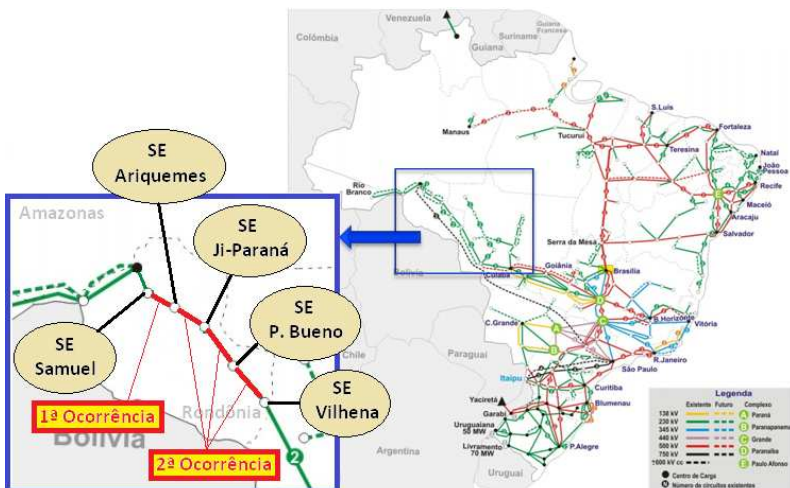


Figura 4.8 – Localização geográfica dos eventos de 12/06/2011.

O gráfico presente na Figura 4.9 contém dados da tensão na sequência positiva e indica os instantes de ocorrência dos dois eventos.

É possível observar que a anomalia está presente nos dados da UNIR. Na Figura 4.10 são mostrados apenas os dados de tensão das três fases desta PMU.

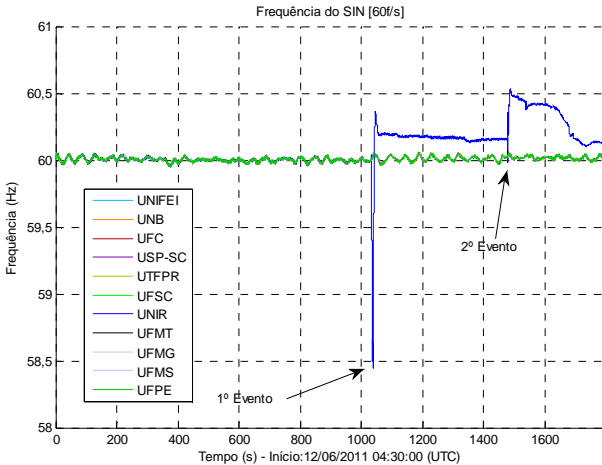


Figura 4.9 – Localização temporal dos eventos de 12/06/2011.

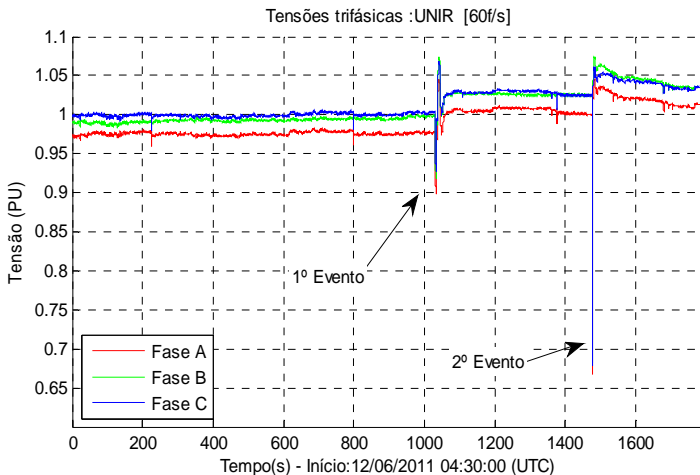


Figura 4.10 – Tensão trifásica na PMU UNIR de 12/06/2011.

Um gráfico importante para ser observado é a diferença angular. A Figura 4.11 apresenta a diferença angular das PMUs utilizando como referência a UFSC. Observa-se que todos os dados mantêm-se num padrão até o início do evento de perda de interligação, onde a diferença angular da UNIR foge deste padrão e varia constantemente, num claro indicativo de abertura de interligação. A Figura 4.12 contém um zoom do início do evento, onde é possível observar que o valor da diferença angular varia de $+180^\circ$ a -180° (ou de $+\pi$ radianos a $-\pi$ radianos).

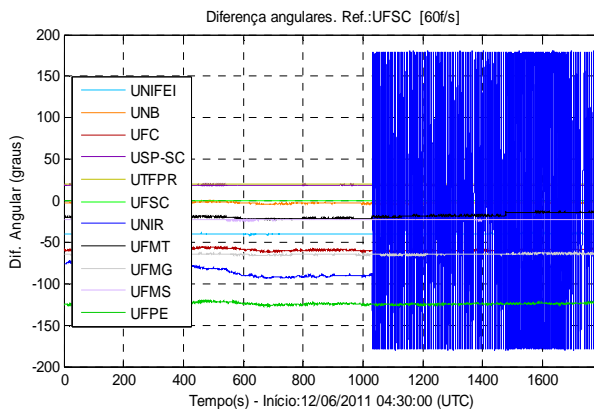


Figura 4.11 – Diferença angular (Referência: UFSC) de 12/06/2011.

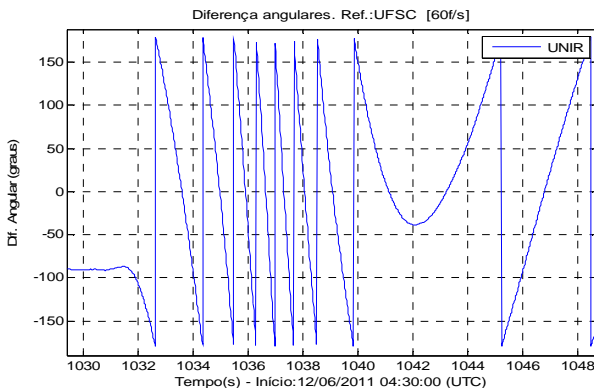


Figura 4.12 – Diferença angular UNIR/UFSC de 12/06/2011.

A Figura 4.13 apresenta o gráfico da frequência das PMUs. No 1º Evento destacado, observa-se que a frequência alcançou o valor para ativar o 1º estágio do ERAC. Para comprovar, faz-se um zoom nesta área, mostrado na Figura 4.14.

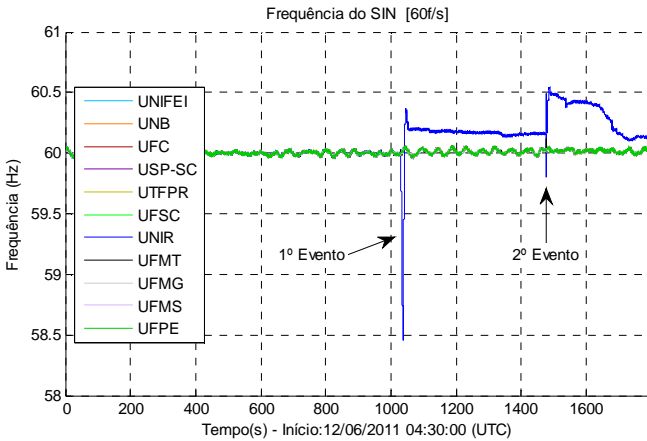


Figura 4.13 – Frequência do sistema durante o caso de estudo I.

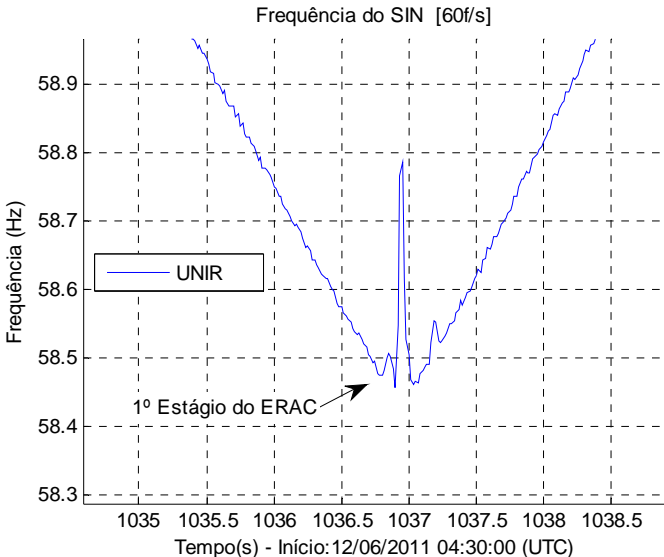


Figura 4.14 – Frequência na PMU UNIR durante o 1º estágio do ERAC.

Então, da Figura 4.9 até a Figura 4.14 constatou-se que durante essa ocorrência houve a perda da interligação Acre-Rondônia/SIN e a atuação do 1º estágio do ERAC e que, no período analisado (entre 04h30min e 05 horas) não houve o restabelecimento da interconexão.

4.6.2 Aplicação da Metodologia à Ocorrência

Para fazer a análise deste evento foram adquiridos do PDC os dados deste dia (12/06/2011) provenientes de todas as PMUs disponíveis entre 04h30min e 05 horas, no horário oficial de Brasília.

No ambiente Dados (os ambientes do programa foram descritos no item 3.3.5) a PMU escolhida foi a UNIR e executou-se o programa.

Assim que o programa termina de processar os dados, são apresentados os resultados nos ambientes “Relatório de Resultados” e “Visualização Gráfica”. A tela com a saída do programa está mostrada na Figura 4.15.

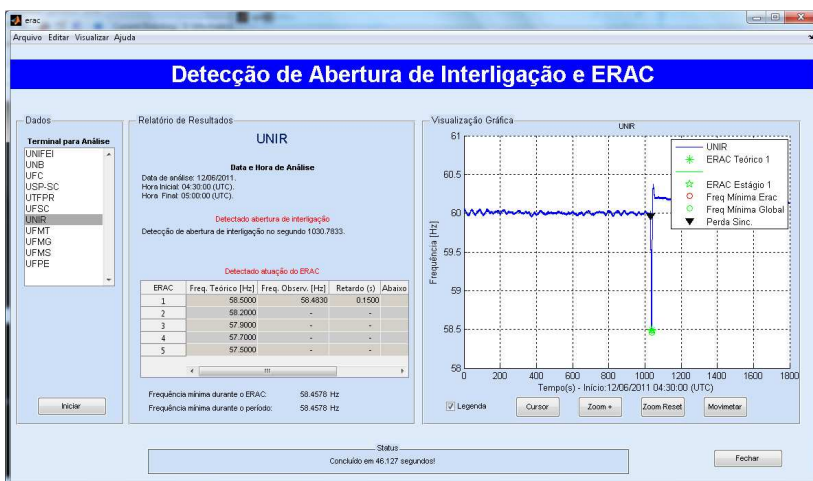


Figura 4.15 – Tela com resultados da análise de 12/06/2011.

O ambiente “Relatório de Resultados” apresenta todos os valores numéricos apresentado no ambiente “Visualização Gráfica”. A Figura 4.16 é a representação dos resultados obtidos pelo programa.

Conforme descrito no item 3.3.5, o ambiente Relatório de Resultados é subdividido em quatro campos. O 1º campo (data) apresenta informações dos dados de entrada do programa, sendo esse evento do dia 12/06/2011 e os dados são de 04h30min às 05 horas, possuindo então 30 minutos de dados analisados, ou seja, são 361.800 fasores de cada PMU (60 fasores por segundo x 60 segundos x 30 minutos).

O 2º Campo (interligação) apresenta informações de abertura e restabelecimento da interligação. Neste evento foi detectado a abertura da interligação e o programa apontou no segundo 1030,78. Isto significa que, considerando o início dos dados à 04 horas, foi detectado o início da perda da interligação com o SIN no horário 04h47min30,78seg.

O 3º campo (ERAC) apresenta informações sobre o ERAC, apresentando os valores teóricos de cada estágio, os valores observados, o retardo entre o valor teórico e o detectado e o tempo em que a frequência ficou abaixo de cada patamar (estágio) do ERAC.

Analisando os dados fornecidos pela Figura 4.16 é possível observar que neste evento o ERAC funcionou em conformidade para sua função, com um retardo de 150 milissegundos após a passagem da frequência teórica para atuação (58,5 Hz) e resultando em que a frequência tenha ficado em torno de 417 milissegundos abaixo do patamar de frequência do primeiro estágio do ERAC.

O 4º e último campo (Frequência) apresenta a excursão de frequência mínima alcançada durante o evento foi 58,4878 Hz, ocorrida à 04h47min16,91seg.

A Figura 4.17 contém os coeficientes de aproximação da TWD com quatro iterações efetuadas (o sinal em vermelho é o sinal original).

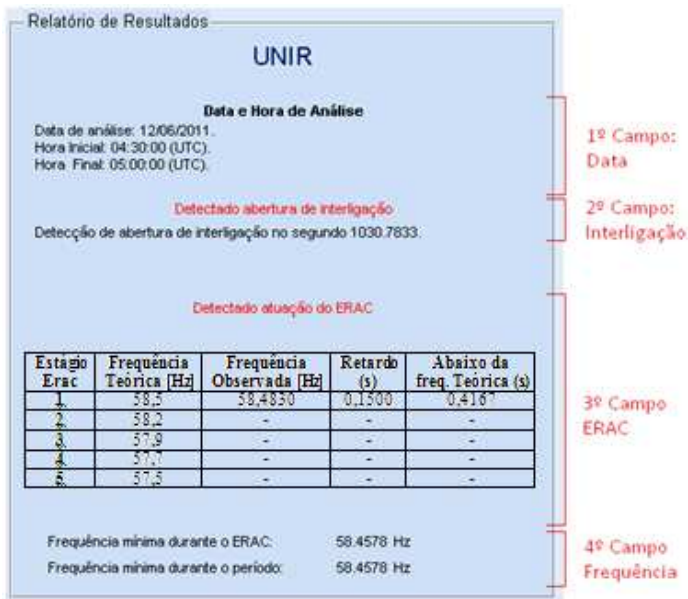


Figura 4.16 – Resultados do Ambiente Relatório de Resultados.

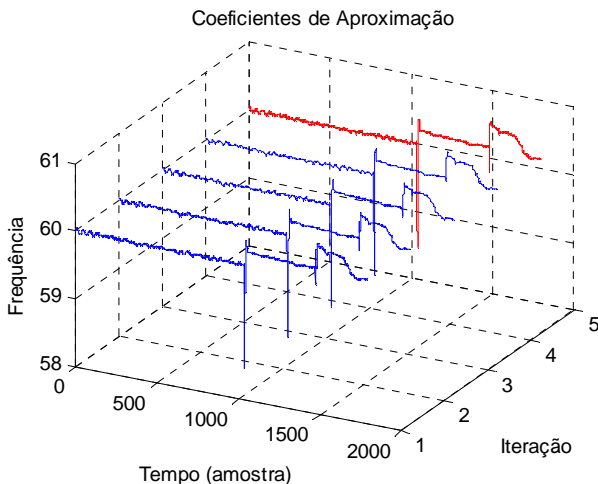


Figura 4.17 – Coeficiente de aproximação de todo o sinal.

Conforme descrito na subseção 2.6, o programa utiliza para detecção dos eventos os dados fornecidos através dos coeficientes de detalhamento que são gerados previamente antes da indicação dos pontos candidatos através da HWT.

A Figura 4.18 contém o resultado de cada iteração da TWD para este evento, apresentando o coeficiente de detalhamento.

O ambiente “Visualização Gráfica” apresenta o gráfico com o sinal da frequência do sinal de entrada. O programa detectou alguns pontos candidatos à análise mais profunda e estes pontos são mostrados na Figura 4.19.

Para melhor visualização, fez-se um zoom na área em que se apresentam os pontos detectados pelo programa. A Figura 4.19 contém uma janela onde estão todos os pontos candidatos no sinal inteiro. Entretanto, os pontos onde o programa apontou algum evento estão muito concentrados para uma observação visual, necessitando ampliar a janela, feita na Figura 4.20.

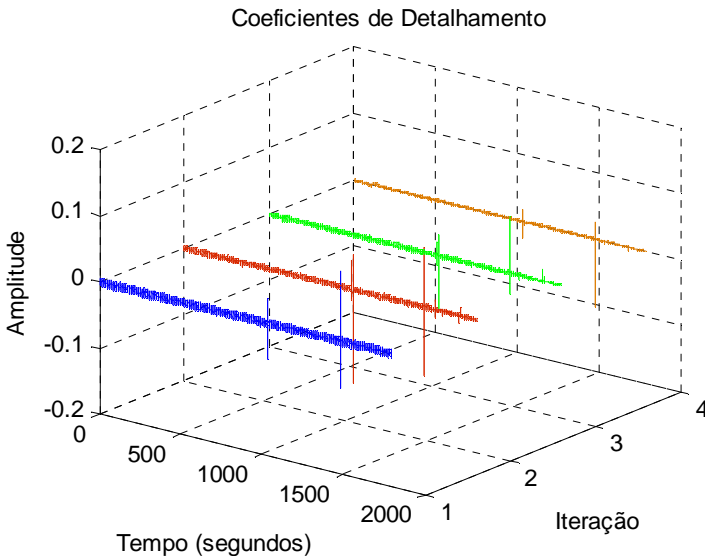


Figura 4.18 – Coeficientes de detalhamento em cada iteração

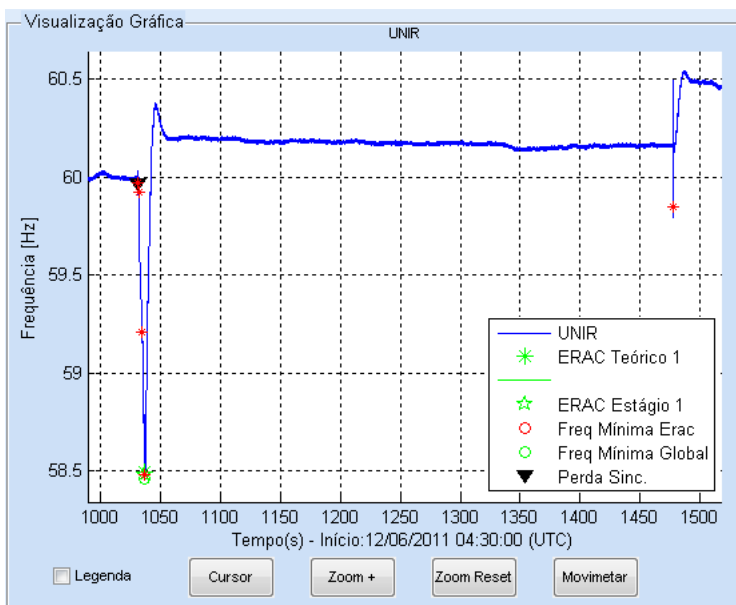


Figura 4.19 – Pontos candidatos no sinal de entrada.

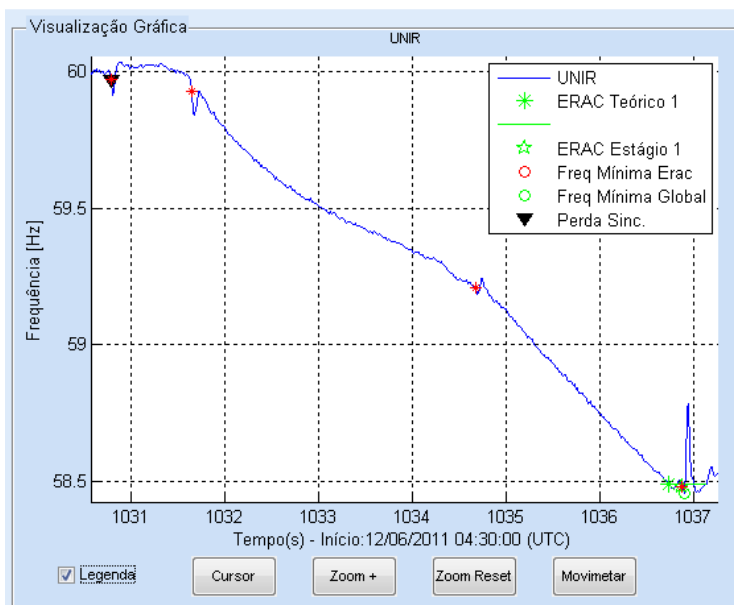
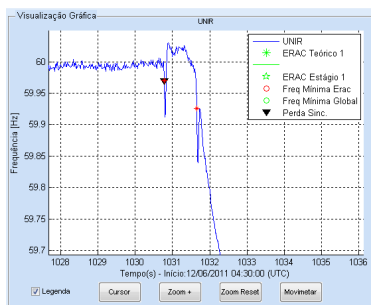


Figura 4.20 – Janela ampliada com os eventos detectados.

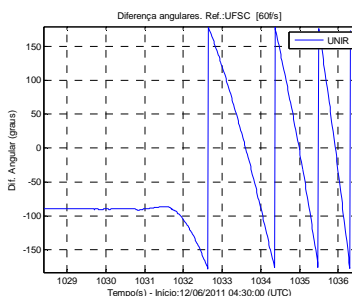
a) Detecção de abertura de interligação

A abertura da interligação foi detectada no segundo 1030.7833, lembrando que os dados inseridos no programa são de 04h30min às 05 horas, ou seja, o programa indica que a abertura da interligação ocorreu à 04h47min30.78seg.

A Figura 4.21 (a) apresenta a indicação no ambiente gráfico do programa do ponto onde houve a detecção da abertura da interligação, enquanto a Figura 4.21 (b) mostra o gráfico gerado pelo DFAM com a diferença angular entre a UNIR e a UFSC (sendo a UFSC a referência angular), onde é possível observar que a diferença angular entre ambos era constante até o momento da abertura da interligação, onde a diferença angular decresce continuamente.



(a)



(b)

Figura 4.21 – Momento da abertura da interligação.

b) Detecção do 1º Estágio do ERAC

Houve a detecção da atuação do 1º estágio do ERAC. Toda a análise gráfica está presente na Figura 4.22, onde é possível observar que a frequência alcançou o valor para atuação do primeiro estágio do ERAC (os valores para atuação em cada estágio estão presentes na Tabela 4.5).

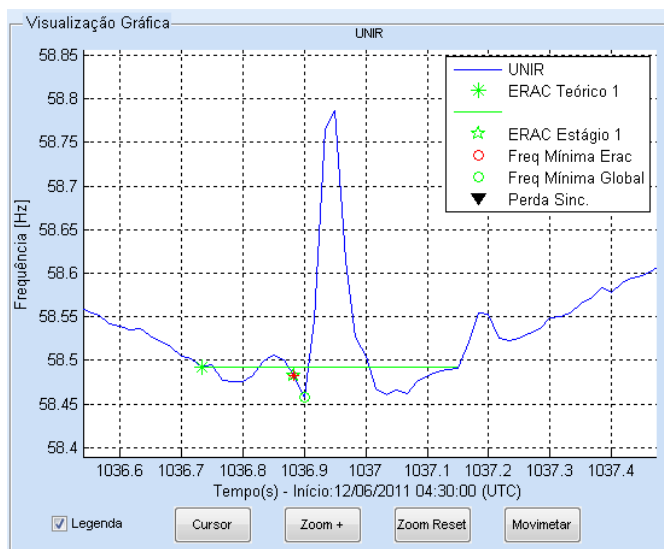


Figura 4.22 – 1º estágio do ERAC.

4.6.3 Resumo da primeira análise

A Tabela 4.8 apresenta um resumo desta primeira análise. Esta primeira análise foi detalhada com objetivos “didáticos”, pois houve apenas a atuação do primeiro estágio do ERAC ocorrido após a perda da interligação Acre-Rondônia/SIN.

12/06/2011	Abertura da Interligação	Estágios do ERAC					Restabelecimento da Interligação
		1º	2º	3º	4º	5º	
Real	X	X					
Detectado	X	X					

Tabela 4.8 – Resultados obtidos da primeira análise.

Nesse evento houve inicialmente a abertura da interligação Acre-Rondônia com o SIN, que foi corretamente detectada e apontada no gráfico do ambiente “visualização gráfica”. Além disso, também houve a atuação do primeiro estágio do ERAC, que também foi detectado corretamente pelo programa e apontado graficamente, mas observando

visualmente o gráfico da Figura 4.22, o local apontado pelo programa não foi exatamente no momento da atuação do ERAC, mas no ponto anterior, o que não tira o mérito da detecção.

4.7 Caso de Estudo II – Ocorrência de 27/05/2011

4.7.1 Descrição da Ocorrência

No dia 27 de maio de 2011, às 02h42min, houve o desligamento automático da linha de transmissão de 230 kV que interliga as subestações de Ji-Paraná e Pimenta Bueno, ambas no estado de Rondônia. Em virtude disso, houve a interrupção de 182 MW de cargas (138 MW em Rondônia e 44 MW no Acre). No momento da ocorrência houve o desligamento automático das unidades geradoras 1 e 2 da usina termelétrica Termonorte II, situada em Porto Velho (RO), ocasionando a perda de 136 MW de geração. Em seguida, às 02h55min, houve o desligamento automático da unidade geradora STG (geração de 109 MW), também da Usina Termelétrica Termonorte II. Iniciou-se a recomposição das cargas às 02h54min (ONS, 2011).

A Figura 4.23 mostra detalhes da localização do evento e das linhas envolvidas.

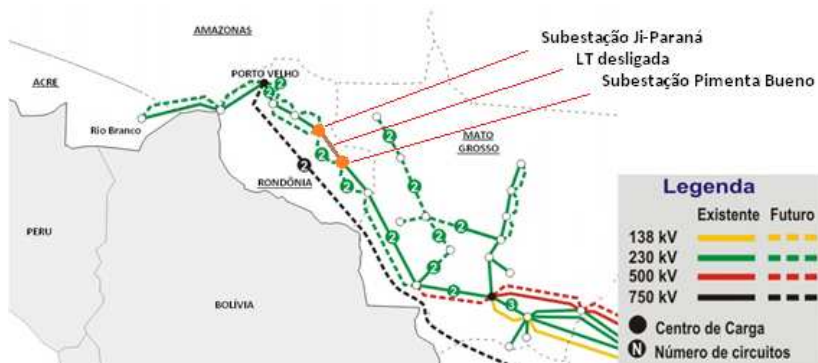


Figura 4.23 – Localização geográfica dos eventos de 27/05/2011.

A Figura 4.24 mostra o gráfico de tensão das PMUs disponíveis neste período, enquanto que a Figura 4.25 mostra o gráfico da diferença angular, tendo como referência a PMU UFSC, onde fica claro que houve perda e restabelecimento da interligação, uma vez que após haver a variação da diferença angular o valor se estabilizou.

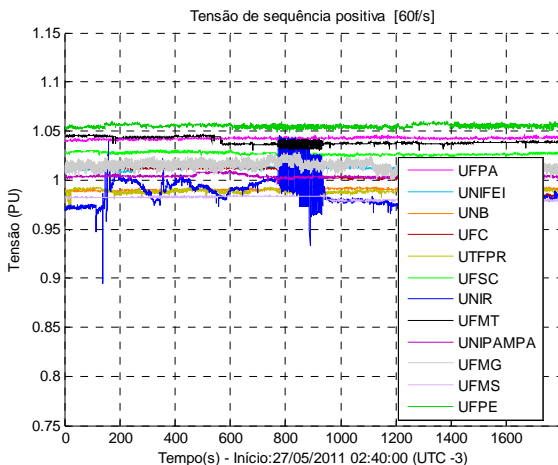


Figura 4.24 – Gráfico de tensão durante a perturbação.

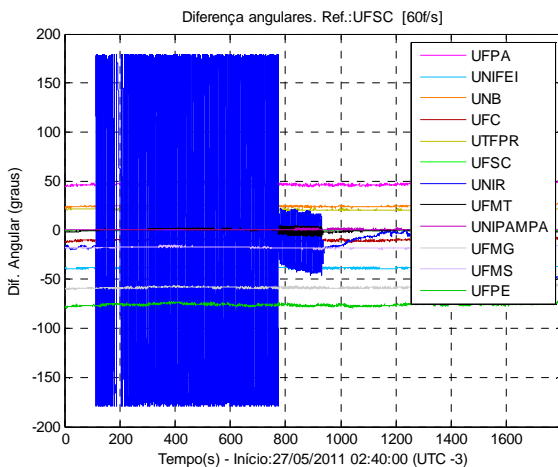


Figura 4.25 – Gráfico da diferença angular durante a perturbação (Referência: UFSC).

A Figura 4.26 apresenta uma janela de tempo da diferença angular contendo apenas os dados da UNIR e referência a UFSC, podendo ser observado o início da perda da interligação, onde o valor da diferença angular não é mais constante.

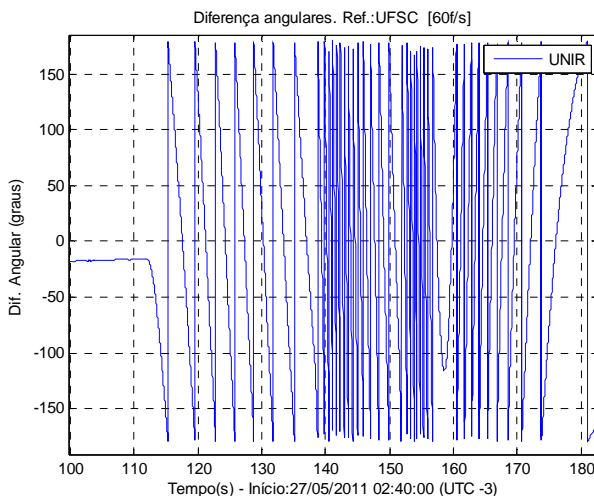


Figura 4.26 – Diferença angular UNIR/UFSC de 27/05/2011.

A Figura 4.27 apresenta o gráfico de frequência das PMUs, onde destaca-se a PMU da UNIR. Observa-se que a excursão de frequência ficou abaixo dos valores de ajustes para atuação de vários estágios do ERAC. Para observar com mais detalhes, é feito um zoom na Figura 4.27 em dois locais distintos, onde o primeiro zoom está representado na Figura 4.28 e o segundo na Figura 4.29.

Através dessas duas figuras observa-se que foram necessárias atuações de quatro estágios do ERAC para que a frequência pudesse retornar ao valor nominal, quando se efetuou a reintegração da interligação. Entretanto, nota-se um fenômeno durante a restauração da interligação, a oscilação de frequência pouco amortecida (análise é mostrada na Figura 4.36).

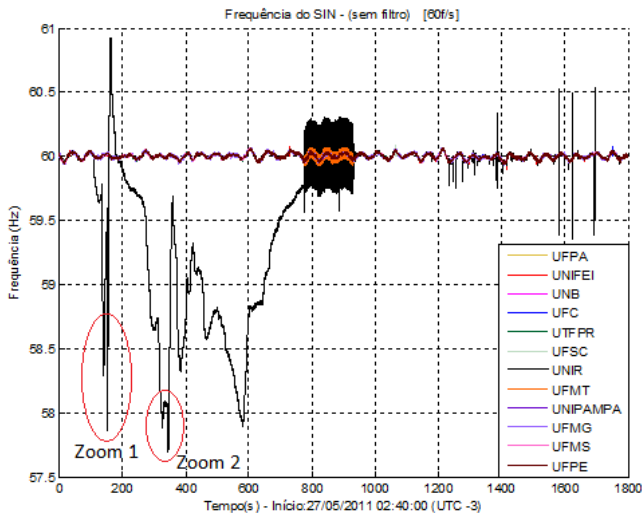


Figura 4.27 – Gráfico de frequência do estudo de caso II.

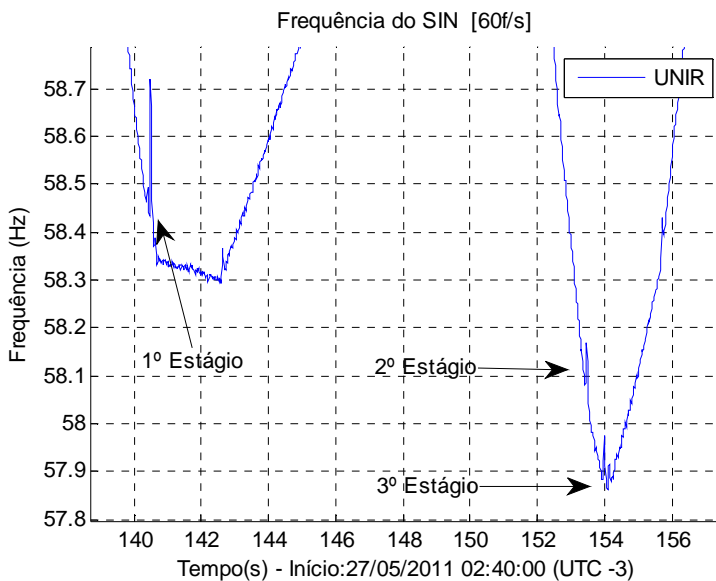


Figura 4.28 – Primeiro zoom da frequência.

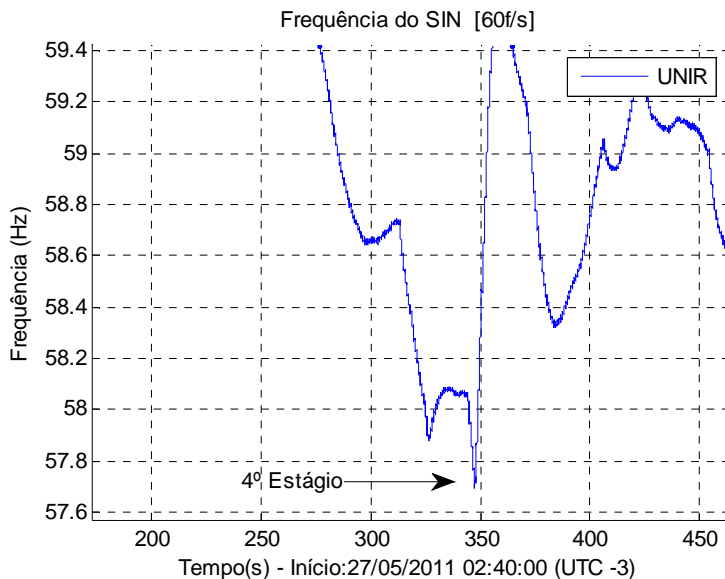


Figura 4.29 – Segundo zoom da frequência.

Constatou-se então que durante essa ocorrência houve a perda da interligação Acre-Rondônia/SIN e a atuação de 4 estágio do ERAC, além do restabelecimento da interligação e que houve uma oscilação pouco amortecida durante este restabelecimento

4.7.2 Aplicação da Metodologia na Ocorrência

Para a análise, foram aquisitados do PDC os dados das PMUs com início às 05h40min do dia 27/05/2011 com uma duração de 1800 segundos, ou seja, o último dado é marcado às 06h10min. A Figura 4.30 apresenta o resultado obtido do programa utilizando esses dados adquiridos. A Figura 4.31 contém uma melhor visualização do ambiente “Relatório de Resultados”.

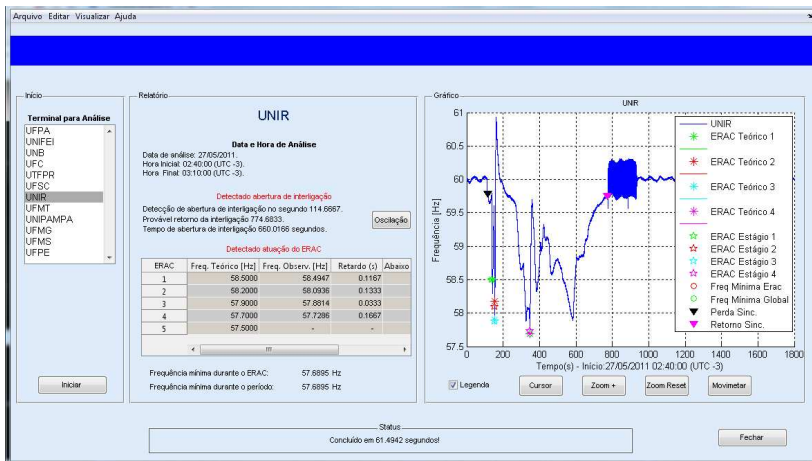


Figura 4.30 – Apresentação de resultados.



Figura 4.31 – Resultados numéricos da segunda análise.

Neste caso foi identificada a abertura da interligação e também a sua restauração. Assim como na análise do caso de estudo I, são mostrados neste item os resultados gráficos obtidos através da TWD, apresentados na Figura 4.32 e Figura 4.33.

A Figura 4.32 mostra os primeiros quatro níveis dos coeficientes de aproximação em uma janela contendo 100 pontos de dados resultante da aplicação da TWD para o sinal de frequência da Figura 4.27 (somente o sinal da UNIR).

Já a Figura 4.33 contém os coeficientes de detalhamento de cada iteração. Na última iteração executada, é onde podem ser visualizados com maior facilidade os instantes de tempo onde o aplicativo fez o processamento e identificou os eventos procurados.

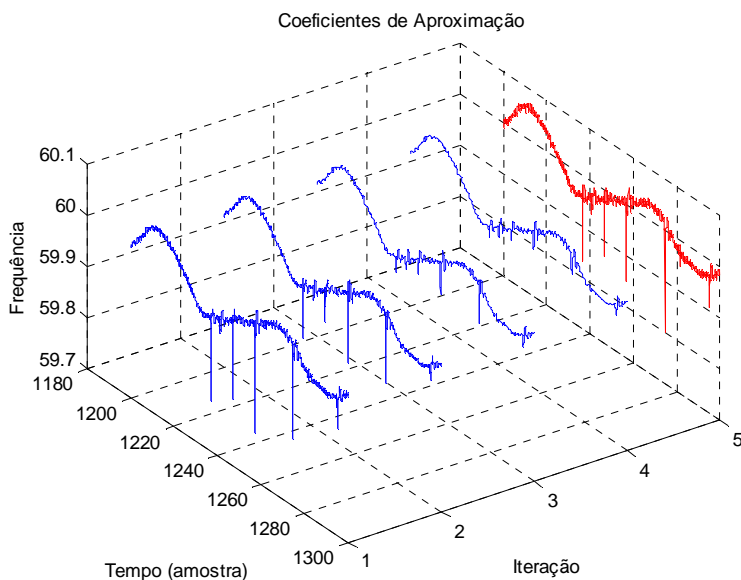


Figura 4.32 – Coeficientes de aproximação em 4 níveis de iteração do caso de estudo II

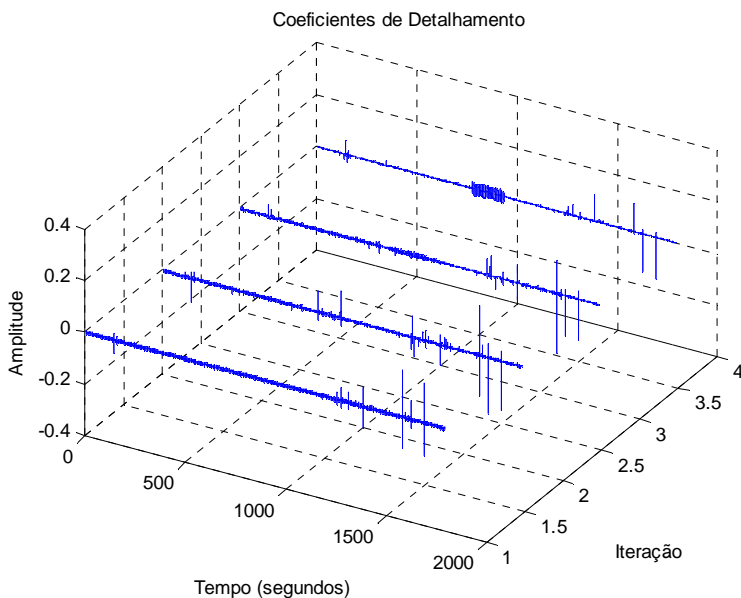


Figura 4.33 – Coeficientes de detalhamento em 4 níveis de iteração do caso de estudo II

c) Detecção de abertura e restabelecimento de interligação

A Figura 4.34 apresenta a indicação no ambiente gráfico do programa o ponto onde houve a detecção da abertura da interligação, enquanto a Figura 4.35 mostra o gráfico gerado pelo DFAM contendo a diferença angular da UNIR tendo como referência a UFSC.

Como houve reintegração da interligação neste evento, foi possível analisar a oscilação gerada (apresentada na Figura 4.36). É utilizado o método de Prony como ferramenta para esse tipo de análise. O resultado (Figura 4.36) é ordenado por nível de energia, sendo a primeira linha representando o modo de oscilação de maior nível de energia. A primeira coluna representa a ordem dos modos de oscilação, a segunda as raízes, a terceira a frequência, a quarta o amortecimento, a

quinta o nível de energia, a sexta a amplitude e a última a fase do modo de oscilação obtido.

Para a análise do método de Prony, é utilizada para análise uma janela de tempo de 774,6833 a 794,6833 segundos e, neste caso, como é mostrado na Figura 4.27, houve após a reintegração da interligação, um tempo considerável com os primeiros modos de oscilação com baixíssimo amortecimento.

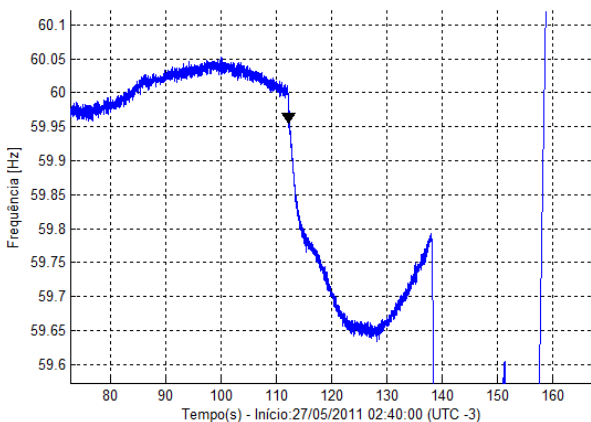


Figura 4.34 – Momento da abertura da interligação do estudo de caso II.

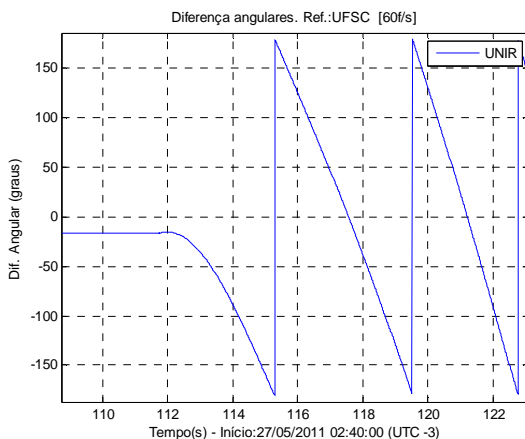


Figura 4.35 – Momento da abertura da interligação do estudo de caso II – análise com diferença angular entre UNIR - UFSC.



Figura 4.36 – Análise da oscilação durante a restauração do sistema.

d) Detecção do 1º estágio do ERAC

Nesta ocorrência, houve a detecção da atuação de 4 estágios do ERAC. Toda a análise gráfica está presente na Figura 4.37 e será detalhado cada estágio nos próximos parágrafos.

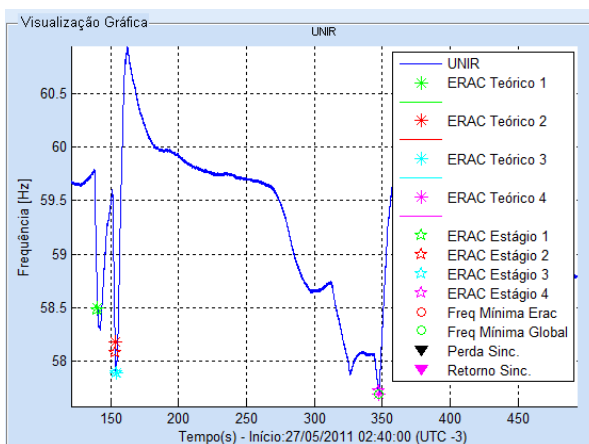


Figura 4.37 – Detecção dos estágios do ERAC do estudo de caso II.

O gráfico envolvendo o valor teórico para atuação e a detecção pela metodologia está representada na Figura 4.38. É possível observar nesse gráfico a frequência alcançada (asterisco verde) não está em 58,5 Hz referentes ao primeiro estágio do ERAC do sistema Acre-Rondônia (vide Tabela 4.5), mas sim no primeiro ponto que está abaixo deste valor.

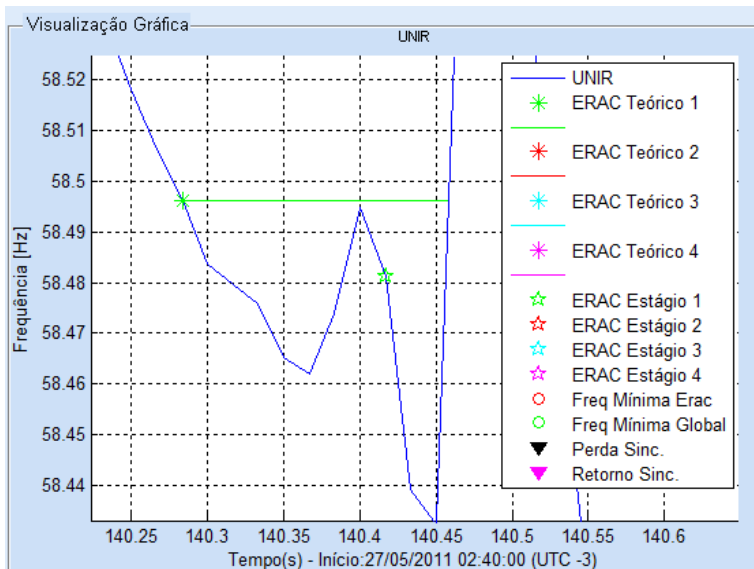


Figura 4.38 – Primeiro estágio do ERAC do estudo de caso II.

e) Detecção do 2º estágio do ERAC

Diferente da detecção do primeiro estágio, a detecção desse estágio (estrela vermelha) ocorreu exatamente no ponto em que ele foi realizado (ver Figura 4.30).

A marcação do ponto teórico (asterisco vermelho) é feita sempre no primeiro ponto em que o valor da frequência é igual ou inferior aos valores teóricos do ERAC, e que para esse segundo estágio é de 58,2 Hz.

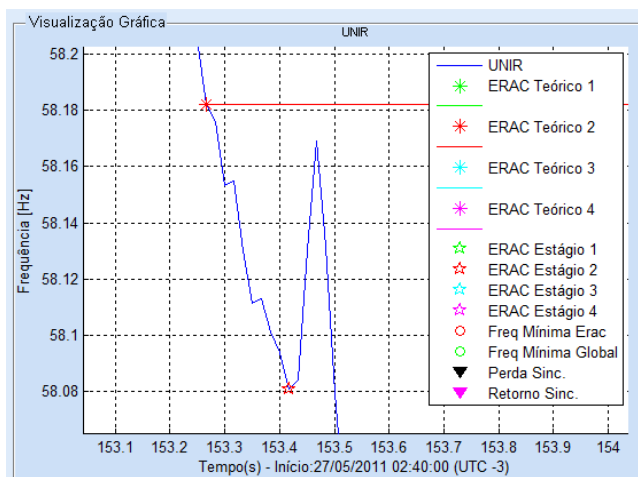


Figura 4.39 – Segundo estágio do ERAC do estudo de caso II.

f) Detecção do 3º estágio do ERAC

A Figura 4.40 contém o gráfico de frequência na região de atuação do terceiro estágio do ERAC. Diferente da detecção dos dois estágios anteriores, a detecção neste estágio (estrela azul claro) ocorreu um ponto após a execução do ERAC, ou 16,67 ms.

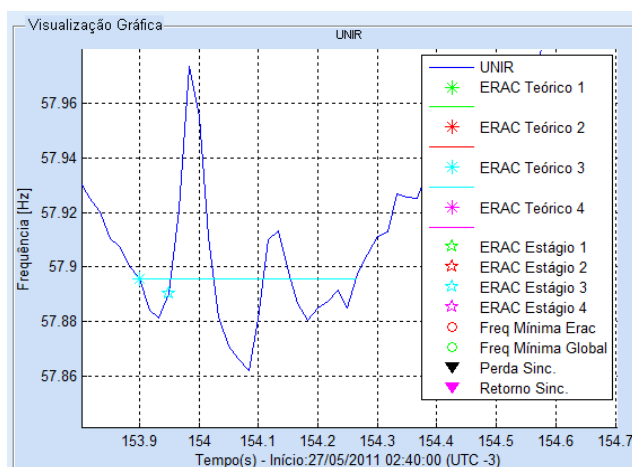


Figura 4.40 – Terceiro estágio do ERAC da segunda análise.

g) Detecção do 4º estágio do ERAC

O quarto e último estágio envolvido nesta ocorrência é representado na Figura 4.41. A detecção deste estágio (estrela rosa) apresentou a maior deficiência dos quatro estágios envolvidos. Enquanto que todos os outros apresentaram uma diferença entre o real e detectado de no máximo 2 pontos de dados (ou 33,33 ms) este apresentou uma diferença de 5 pontos de dados (ou 83,33 ms), devido esta parte do sinal apresentar um ruído maior que no resto do sinal de frequência.

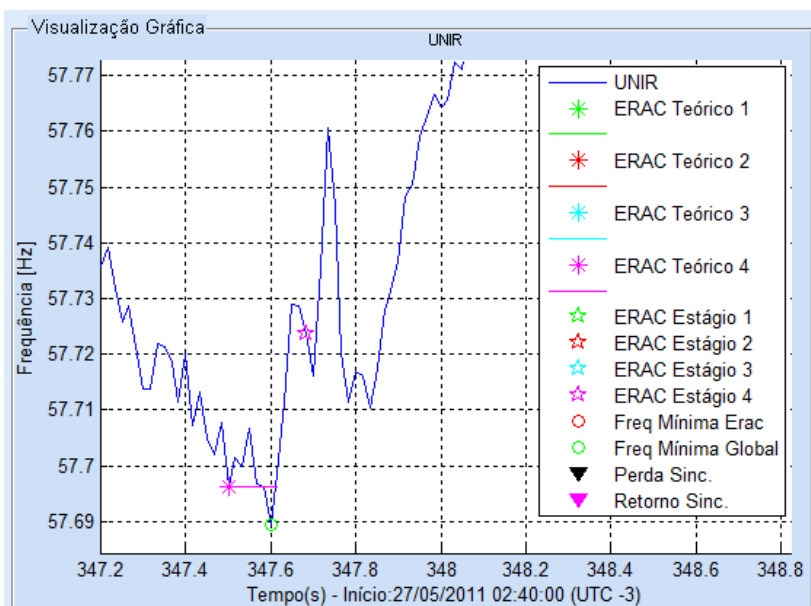


Figura 4.41 – Quarto estágio do ERAC da segunda análise.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu uma metodologia para análise automática de eventos de ilhamento através de dados da medição fasorial sincronizada.

Com os desenvolvimentos descritos e analisados neste trabalho, é possível concluir que as dificuldades encontradas foram superadas e as metas e objetivos foram alcançados.

Inicialmente foi realizada uma coleta de informações sobre Medição Fasorial Sincronizada, observando o novo paradigma que ela representa, uma vez que para este trabalho o SMFS é a fonte de dados para o programa desenvolvido. Foi importante conhecer o real significado de Medição Fasorial Sincronizada para entender o seu verdadeiro potencial.

A Medição Fasorial Sincronizada é capaz de informar com a precisão temporal de um relógio GPS as medidas de tensão, corrente e frequência. Essas três variáveis elétricas são de extrema importância para o monitoramento do comportamento do sistema elétrico, onde o monitoramento da frequência é importante para esquemas como o de alívio de carga, responsável por desligar um montante de carga pré-determinado para controlar o balanço geração/carga em eventos como ilhamentos.

O Esquema Regional de Alívio de Carga é dividido em estágios, onde cada um deles, no Brasil, é responsável por desconectar da rede uma porção considerada menos importante de carga (são salvaguardados serviços essenciais como hospitais, por exemplo). Sua atuação é especificada pelo operador e para detectá-lo necessita-se de uma ferramenta que possa ser trabalhada principalmente no sinal de frequência, apontando os pontos da ocorrência para analisar, entre outros, a variação de frequência da atuação com o valor teórico determinado e o atraso de tempo decorrido com o valor teórico.

Os estudos realizados demonstraram ser a transformada *Wavelet* a ferramenta selecionada para os objetivos deste trabalho, uma vez que ela é capaz de decompor o sinal em

escalas de frequência (assim como a transformada de Fourier) e tempo. A transformada *wavelet* aplicada sobre um sinal de frequência apresenta em seu coeficiente de detalhamento os pontos no tempo onde há variações mais abruptas do sinal original, facilitando a identificação dos eventos.

A validação da metodologia desenvolvida utilizou dados de eventos reais, obtidos do Sistema de Medição Fasorial Brasileiro provenientes do MedFasee-BT, que atualmente dispõe de 22 PMUs localizadas em todo o território nacional. São enviados para o PDC fasores a uma taxa de 60 fasores por segundo, permitindo maior visualização dinâmica do sistema e principalmente dos eventos em análise.

O ambiente computacional escolhido para desenvolvimento deste trabalho foi o ambiente Matlab[®], pois esta ferramenta apresenta muitas facilidades para desenvolvimento e aplicação de novas ferramentas. O Matlab[®] permite facilmente que o usuário trabalhe com vetores e matrizes de uma forma muito simplificada, principalmente com inversão de matrizes e produto matricial. Outra ferramenta do Matlab[®] voltada para o desenvolvimento é o Gui *layout editor*, capaz de criar interfaces visuais apresentação de resultados e entrada de dados, tornando as ferramentas desenvolvidas fáceis de manejar e mais intuitivas para o usuário. O recurso mais chamativo do Matlab[®] é o seu depurador, que é capaz de apontar, muitas vezes com clareza, o local e o tipo de erro que o desenvolvedor cometeu, proporcionando agilidade no desenvolvimento e menor tempo gasto na programação. A linguagem utilizada pelo Matlab[®] se assemelha muito com as linguagens C e C++ amplamente conhecidas, com algumas facilidades atrativas para um usuário que está dando os primeiros passos em programação.

A aplicação desenvolvida foi base para o artigo “Aplicação da Transformada *Wavelet* Discreta para a Detecção de Eventos no SIN Utilizando Dados Fasoriais Sincronizados” (BRUSTOLIN *et al*, 2012), onde foi possível demonstrar o

programa criado para aplicação da metodologia desenvolvida funcionando e foi apresentada uma análise do evento ocorrido no dia 27/05/2011, onde o programa foi capaz de apontar o instante da perda da interligação Acre-Rondônia/SIN, a atuação dos 4 estágios do ERAC e o restabelecimento da interligação, mostrando graficamente todos os pontos e apresentando uma tabela comparativa de cada estágio do ERAC.

Além dos dois eventos detalhados no Capítulo 4, diversas outras análises foram efetuadas de muitos eventos no sistema Acre-Rondônia e, com base nos resultados do Capítulo 4, pode-se concluir que o objetivo de criar um sistema para identificar automaticamente o momento de ilhamento, a possível atuação do ERAC, a recomposição do sistema e analisar os resultados obtidos foi alcançado de forma satisfatória. Além de apontar os instantes de cada ocorrência, a apresentação dos resultados no ambiente “visualização gráfica” mostra de uma forma simples e intuitiva a posição no gráfico de frequência o instante em que cada evento teve sua origem. Além disso, todas as análises que foram realizadas no referido capítulo foram importantes para observar que a metodologia implementada funciona com um bom grau de satisfação.

5.1 Contribuições

Através do desenvolvimento deste trabalho de dissertação, criou-se uma metodologia capaz de utilizar recursos da transformada *wavelet* para analisar dados fasoriais sincronizados. A contribuição principal deste trabalho foi a criação de aplicativo em ambiente Matlab[®] capaz de apresentar um diagnóstico automatizado da análise de um evento no sistema Acre-Rondônia/SIN cujos fasores são captados através do sistema de medição fasorial brasileiro do projeto MedFasee-BT.

O aplicativo apresenta seu diagnóstico em forma de tabela, onde realiza um comparativo da atuação do Esquema

Regional de Alívio de Carga detectado no sinal com os respectivos valores teóricos, mostrando os valores teóricos de atuação frente aos valores reais, o atraso entre ambos os valores, permitindo analisar o desempenho temporal de cada estágio, e comparando também com o tempo em que a frequência do sinal analisado fica abaixo do patamar de cada estágio do ERAC.

Além de apresentar um comparativo por tabela, o aplicativo também apresenta graficamente o sinal analisado e aponta no próprio gráfico os locais onde houve a detecção de cada estágio do ERAC. Também são apresentados neste mesmo gráfico a localização da perda de interligação com o sistema nacional e também o seu restabelecimento, caso o sinal analisado o contemple.

Foi explorada a TWD para as análises deste aplicativo a localização temporal das ocorrências das frequências decompostas e que são apresentadas nos coeficientes de detalhamento de cada iteração. Com isso, foi demonstrada que a transformada *wavelet* pode ser utilizada em dados de frequência, diferente de como é utilizado na maioria das referências bibliográficas consultadas, onde é explorada a transformada *wavelet* para análises de sinais de tensão e corrente.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O aplicativo apresentou bom desempenho, sendo capaz de realizar detecção de abertura de interligação, atuação de cada estágio do ERAC e a retomada da interligação. Entretanto, conforme proposta original deste trabalho, o aplicativo realiza somente os diagnósticos com os dados históricos obtidos do PDC através de programas de terceiros.

As análises efetuadas pelo aplicativo são realizadas no modo *off-line*, o que quer dizer que já é de conhecimento a

existência da ocorrência e deve-se então adquirir os dados no período da ocorrência para então o aplicativo fazer o diagnóstico. É factível que o aplicativo possa realizar esse diagnóstico em tempo real, recebendo diretamente os dados do PDC e, ao detectar um dos eventos programados (abertura de interligação, ERAC, retomada de interligação) possa gerar um alerta ao utilizador e, ao fim da ocorrência (restabelecimento da frequência aos valores nominais) gerar o relatório completo, apresentando as mesmas informações no diagnóstico gerado atualmente, no modo *off-line*.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L. C. de. Banco de Filtros *Wavelets* com Fator de Escala Maior que Dois. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais. Março de 2007.
- ARAÚJO, M da S.; BARREIROS, J. A. L.; ORLANDO F. Influência de *wavelets*-mães e da ordem delas no desempenho de um localizador de faltas. XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE. Blumenau/SC. 03 a 06 de Outubro. 2011.
- AZEVEDO, G. P. de.; FEIJÓ, B.; COSTA, M. A estrutura da próxima geração de centros de controle de energia elétrica. XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XV SNPTEE. Grupo de estudos de Operação do Sistemas Elétricos - GOP 14. Foz do Iguaçu / PR. 17 a 22 de Outubro. 1999.
- BARSANTI, R. J. *Wavelet* noise removal from baseband digital signals in bandlimited channels. 42nd Symposium on System Theory (SSST), Pp.111-115. 7-9, March. 2010
- BEGOVIĆ M., NOVOSEL, D., DJOKIĆ, B. Issues Related to the Implementation. Proceedings of the 41st Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Pag 164. 7 a 10 de Janeiro. 2008.
- BEVRANI, H.; TIKDARI, A. G.; HIYAMA, T. An intelligent based power system load shedding design using voltage and frequency information. 2010 International

- Conference on Modelling, Identification and Control, Okayama, July 2010.
- BOLZAN, Maurício José Alves. Transformada em ondeleta: uma necessidade. Revista. Brasileira de Ensino de Física. Vol.28. Nº 4, Pag. 563 a 567. 2006.
- BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. A non-differentiable *wavelet* algorithm for transient analysis. International Conference on Power system Transients – IPST. Rio de Janeiro. June. 2001.
- BRUNO, S.; BENEDICTIS, M. de; SCALA Scala, M. la. “Taking the pulse” of Power Systems: Monitoring Oscillations by *Wavelet* Analysis and Wide Area Measurement System. IEEE Power Systems Conference and Exposition - PSCE '06. Pag. 436-443. 29 de Outubro. 2006.
- BRUSTOLIN, G.; MANTELLI, F. M.; SILVA, P. A. S. da; ROLIM, J. G.; DECKER, I. C. Aplicação da Transformada *Wavelet* Discreta para a Detecção de Eventos no SIN Utilizando Dados Fasoriais Sincronizados. XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - XII SEPOPE. Rio de Janeiro. 20 a 23 de Maio. 2012.
- CAMINHA, A. C. Introdução à proteção dos sistemas elétricos. Edgard Blücher Ltda, 1983.
- CEPEL. SAGE - Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia. Visão Geral. Arquivo capturado em 10 de Fevereiro de 2013. Disponível em <http://www.ceron.com.br/www/down_anx/ANEXO_1_SAGE.pdf>

-
- CEPEL. Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia. Arquivo capturado em 20 de Fevereiro de 2013. Disponível em <<http://www.sage.cepel.br>>.
- CHEN, W.; MALIK, O. P.; YIN, X.; CHEN, D.; ZHANG, Z. Study of *wavelet*-based ultra high speed directional transmission line protection. IEEE Transactions on Power Delevery, Vol. 18, N° 4, Pag. 1134 a 1139. 2003.
- CHUN-LI, L. A Tutorial of the Wavelet. 23 de Fevereiro. 2010.
- COSTA, F. F; COSTA, E. G.; NAIDU, S. R. Digitalização e estudo de descargas parciais utilizando transformada *wavelet* discreta. I Encontro do Grupo de Sistemas elétricos da UFCG – I EGSE. Campina Grande/PB. 20 e 21 de Junho. 2002.
- CRUZ, M. da. Localização de Faltas em Linhas de Transmissão de múltiplos Terminais a Partir de Registros Oscilográficos Sincronizados Via Transformada *Wavelet*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Julho, 2010.
- DANTAS, L.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. de. Análise de transitórios eletromagnéticos via *wavelet* de Haar. I Encontro do Grupo de sistemas elétricos d UFCG – IEGSE. Campina Grande/PB. 20 e 21 de Junho. 2002.
- DECKER, I. C.; EHRENSPERGER, J. G.; AGOSTINI, M. N.; SILVA, A. S.; BETTIOL, A. L.; ZIMATH, S. L. Synchronized Phasor Measurement System:

- Development and Applications. In: IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning - SEPOPE. Rio de Janeiro, RJ, Maio de 2004.
- DECKER, I.C.; AGOSTINI, M.N.; DOTTA, D. et al.; Desenvolvimentos e Aplicações de Medição Fasorial Sincronizada no Sul do Brasil. In: X SEPOPE - Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Florianópolis-SC, Maio de 2006.
- DECKER, I. C.; SILVA, A. S. e; AGOSTINI, M. N.; DOTTA, D. Curso sobre Medição Fasorial – Teoria e Prática. CIGRÉ Brasil – Comitê de estudos B5 – Proteção e Automação. Florianópolis. 2007.
- DECKER, I. C.; AGOSTINI, M. N.; DOTTA, D. BASTOS, M. R.; ZIMATH, S. L. Desenvolvimento e Implementação de um Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada no Sistema de Transmissão de 440 kV da CTEEP, In: XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica 2011. Florianópolis/SC. Outubro. 2011.
- DING, X.; CROSSLEY, P. A. Islanding detection for distributed generation. Power Tech – IEEE. Pap. 1 a 4. Rússia 27 a 30 de Junho. 2005.
- EHRENSPERGER, J. G. Sistemas de medição fasorial sincronizada: análise do estado da arte e aplicações no monitoramento de sistemas de energia elétrica. Programa de Pós-Graduação. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis. 2004.

-
- ELETRONORTE. Dados de Geração dos Estados do Norte do Brasil. Disponível em:
<<http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/pilares/geracao/estados>> . Acessado em Junho de 2013.
- FARIA, R. R. A. Aplicação de *Wavelets* na Análise de Gestos Musicais em Timbres de Instrumentos Acústicos Tradicionais. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.
- FENG, F.; LIU, P.; XUE, R. Applications of Multi-wavelet Noise Reduction Algorithm in the Inertial Navigation Signal Processing. Symposium on Electrical & Electronics Engineering (EEESYM) - IEEE. Pag.475-477. 24 a 27 de Junho. 2012.
- FERNÁNDEZ, R. M. de C; ROJAS, H. N. D. An overview of *wavelet* transforms application in power systems. 14th Power Systems Computation Conference. Sevilla. June, 24-28. 2002.
- FROOQ, O.; DATTA, S. “*Wavelet-based denoising for robust feature extraction for speech recognition*”. IEE Electronics Letters. Vol. 39. Nº 1. Pág 163 a 165. 9 de Janeiro. 2003
- FUNABASHI, T.; KOYANAGI, K.; YOKOYAMA, R. A Review of Islanding Detection Methods for Distributed Resources. IEEE Bologna Powertech Conference. Bologna. 2003.
- FÜSTENBERGER, A. Desenvolvimento de um sistema de concentração de dados de medição fasorial

- sincronizada. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.
- GALVAN, F.; MANDAL, S.; THOMAS, M. Phasor Measurement Units (PMU) instrumental in detecting and managing the electrical island created in the aftermath of Hurricane Gustav. Power Systems Conference and Exposition. PSCE '09. IEEE/PES. Pag. 1,4,15 a 18. Março. 2009.
- GALVAN, F.; MATTHEW, R. Using phasor Measurement units in power system island restoration. IEEE Power and Energy Society General Meeting. Pag 1,3, 22 a 26. Julho, 2012
- GAUSHELL, D. J.; DARLINGTON, H. T. Supervisory control and data acquisition. Proceedings of the IEEE , v. 75, n. 12, p. 1645-1658, December 1987.
- GOMES, R., LIVI, D. P.; SCHUCK, R. Os desafios associados à Interligação do sistema de Transmissão das Usinas do Madeira. Revista Operador Nacional do Sistema Elétrico, Set-Dez. 2011.
- GOMES, A. C. S; ALBARCA, C. D.; FARIA, E. S. T.; FERNANDES, H. H. Histórias Setoriais: O Setor Elétrico. BNDES 50 Anos Dezembro 2002. Arquivo capturado em 23 de Julho de 2012. Disponível em <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/livro_setorial/setorial14.pdf>,
- GÜLER, T.; GROSS, G., "Detection of Island Formation and Identification of Causal Factors Under Multiple Line

-
- Outages. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.22, N^o. 2. Pag. 505 a 513. Maio, 2007.
- HAAR, A. Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme, 1909.
- HOJO, M.; OHNISHI, T.; MITANI, Y.; SAEKI, O.; UKAI, H. Observation of Frequency Oscillation in Western Japan 60Hz Power System Based on Multiple Synchronized Phasor Measurements. Power Tech Conference, Bologna – Itália, 23 a 26 de Junho. 2003.
- IEEE Power Engineering Society. C37.118.2 – IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems. 2011.
- JEREMIAS, T.; ZIMMER, V.; DECKER, I. C.; SILVA, A. S. e; AGOSTINI, M. N. Ambiente de Desenvolvimento de Aplicativos para o Processamento de Dados Fasoriais Sincronizados do Sistema Elétrico Brasileiro. XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - XII SEPOPE. Rio de Janeiro. 20 a 23 de Maio. 2012.
- JEREMIAS, T. Ambiente de Desenvolvimento de Aplicativos para o Processamento de Sincrofasores. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.
- KANE, P. O’.; FOX, B. Loss of Mains Detection for Embedded Generation by System Impedance Monitoring. IEEE International Conference on Developments in Power System Protection. Pag. 95 a 98. Nottingham. Junho. 1997.

-
- KIM, C. H.; AGGARWAL, R. *Wavelet* transforms in Power Systems: Part 1 General introduction to the *wavelet* transforms. Power Engineering Journal, IEEE, p. 81-87, Apr 2000.
- KIM, J. E.; HWANG, J. S. Islanding Detection Method of Distributed Generation Units Connected to Power Distribution Systems. IEEE Power system Technology Conference. Pag. 643 a 647. 2000.
- KUMPULAINEN, L.K.; KAUHANIEMI, K.T. Analysis of the impact of distributed generation on automatic reclosing. Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES. Pág 603 a 608. Vol. 1. 10 a 13 de Outubro. 2004.
- LIMA, L. C.; RODRIGUES, M. A.; TIMBÓ, J.; MOREALE, M. D. S.; VOLKIS, H. A. R.; ESTEVES, A. C. Aplicação de PMU nas Salas de Controle do ONS. VIII SIMPASE - Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, 17 Agosto 2009.
- LIN, T.; TSUJI, M.; YAMADA, Yamada, A *wavelet* approach to real time estimation of power system frequency, Proceedings of the 40th SICE Annual conference. International Session Papers, pp. 58 - 65, 2001.
- LIU, G.; QUINTERO, J.; VENKATASUBRAMANIAN, V. M. Oscillation monitoring system based on wide area synchrophasors in power systems. Bulk Power System Dynamics and Control – VII. Revitalizing Operational Reliability, iREP Symposium. Pp. 1 – 13. Charleston / SC, USA. Ago. 2007.

-
- LUNDGAARD, L. E. Partial Discharge – Part XIII: Acoustic Partial Discharge Detection – Fundamental Considerations. IEEE Electrical Insulation Magazine. Vol. 8. Pag 25-31. Jul/Ago. 1992.
- MAGNAGO, F.; ABUR, A. Fault location using *wavelet*. Transactions on Power Delivery, IEEE. Vol. 13. Pag. 1475 a 1480. Outubro. 1998.
- MEGAHED, A.; MOUSSA, A. M., ELREFAIE, H. B.; MARGHANY, Y. Selection of a Suitable Mother *Wavelet* for Analyzing Power System Fault Transients. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE, 2008.
- MALLAT, S. G. Multiresolution approximations and *wavelet* orthonormal bases of $L^2(R)$. Transactions on American Mathematics (AMS). Soc. 315, no. 1, 69–87. 1989.
- MENDES, S. da C. Análise e Simulação de Algoritmos de Estimção. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Julho, 2005.
- MISTI, M. E. A. *Wavelet* Toolbox TM User's Guide. The MathWorks, Inc., 2007.
- MORETTIN, P. A. Ondas e Ondaletas: da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas, São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999.
- MOURA, J. A. SCADA, Capítulo 9. Automação Industrial. Fundação Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF. Acesso em 25 de novembro de 2012. Disponível em <

http://www.univasf.edu.br/~joseamerico.moura/pag_autom_arquivos/SCADA.pdf

- MOZINA, C. J. Interconnection protection of IPP generators at comercial/industrial facilities. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37. Nº 3. Pág. 681 a 688. Maio e Junho. 2001.
- MUKAI, M.; OKANO, T.; NISHIMOTO, S.; KITANI, I.; ARII, K. Study on degradation diagnosis of partial discharge in a void by *wavelet* analysis. International Symposium on Electrical Insulating Materials. Pag.463 a 466. 17 a 20 de Setembro. 1995.
- NAISANI, P.; THOLOMIER, D.; YIP, T.; LLOYD, G.J. Protection of Distributed Generation (DG) interconnection. 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers. Pág. 1 a 17. 29 de Março a 01 de Abril. 2010.
- NG, T. W.; TAY, T. L.; KHOR. S. W.; Iris recognition using rapid Haar *wavelet* decomposition. 2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPPS). Vol. 1, Pag.V1-820 a V1-823. 5 a 7 de Julho. 2010.
- OLIVEIRA, M. O. de. Proteção Diferencial de Transformadores Trifásicos Utilizando a Transformada *Wavelet*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2009.
- OMAR, Y. R. et al. Under frequency load shedding (UFLS): Principles and implementation. 2010 IEEE International Conference on Power and Energy

- (PECon2010), Kuala Lumpur, Nov 29 - Dec 01 2010.
- ONS – Acre e Rondônia já fazem parte do Sistema Interligado Nacional – SIN. Arquivo capturado em 28 de junho de 2011, disponível em <http://www.ons.org.br/download/sala_imprensa/Nota_interliga%C3%A7%C3%A3o_Acre-Rond%C3%B4nia-271009.pdf>
- PAN, X.; VENKATASUBRAMANIAN, V. Multi-dimensional *wavelet* analysis for power system oscillation monitoring using synchrophasors. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) - 2012 IEEE PES. Pag.1 a 10. 16 a 20 de Janeiro. 2012.
- PEREIRA, L. A.C., LIMA, L. C.; SILVA, A. J. R. S.; MACHADO, P. A.; AMORIM, M. F. P.; FILHO, A. L. O.; AZEVEDO, G. P.; LAMBERT, N.; ZARUR, P. D.; TAVARES, V. V.; HUANG, J. L. C.; COSTA, M. R.; VIDA, C. G.; IENCARELLI, C. E. SAGE – Um Sistema Aberto para a Evolução. Eletroevolução: Sistema de Potência. CIGRÉ. 1995
- PÉREZ, J. F. H.; ARVIZO, D. V.; LELIS, J. M. R.; ACUNA, J. L. O.; MATA, D. T.; TREVIFIO, M. V. A Morlet *Wavelet* Signal Analysis with a Daubechies Filter for Power Quality Disturbances. Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2007. CERMA 2007, pag. 675-680, 25-28 Sept. 2007.
- PINTO, S. C D. Análise de Formas 3D usando *Wavelets* 1D, 2D e 3D. Universidade de São Paulo - Instituto de Física de São Carlos. São Carlos / SP. Outubro. 2005.

- PUJHARI, T. Islanding detection in distributed generation. Dissertação. Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology. 2009.
- REE, J. de La; LIU, Y.; MILI, L.; PHADKE, A.G.; DASILVA, L. Catastrophic Failures in Power Systems: Causes, Analyses, and Countermeasures. Proceedings of the IEEE. Vol. 93, N°. 5. Pag. 956 a 964. Maio. 2005.
- REN, J.; KEZUNIC, M. Real-Time Power System Frequency and Phasors Estimation Using Recursive *Wavelet* Transform. Transactions on Power Delivery, IEEE, Vol. 26, N° 3, Pag. 1392 a 1402. July 2011.
- RIOUL, O.; VETTERLI, M. *Wavelets* and signal processing. Signal Processing Magazine, IEEE. Vol. 8. N°. 4. pag.14-38. Oct, 1991.
- ROCHA, V. Automação e Sensoriamento Remoto utilizando Software Livre. Arquivo capturado em 12 de Janeiro de 2013. Disponível em <<http://www.vivaolinux.com.br/artigo/Automacao-e-Sensoreamento-Remoto-utilizando-Software-Livre-SCADA?pagina=2>>
- ROCKWELL. Flexible Solutions for Your Supervisory Control and Data Acquisition Needs. Rockwell Automation Publication. 2011. Acesso em: 27 novembro de 2012. Disponível em <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/sg/ag-sg001_-en-p.pdf>
- ROPP, M. E.; AAKER, K.; HAIGH, J.; SABBAAH, N. Using power line carrier communication to prevent

- islanding. IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Pag. 1675 a 1678. 2000.
- SANJEKAR, P.S.; DHABE, P.S. Fingerprint verification using Haar *wavelet*. International Conference on Computer Engineering and Technology - (ICCET). Vol. 3, Pag. V3-361- V3-365. 16 a 18 de Abril. 2010.
- SANTOS, M. Análise da Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Usando Dados de Medição Fasorial Sincronizada. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Março. 2008.
- SANTOS, G. A. dos; BARBOSA, E. K.; SILVA, J. F. S. da; ABREU, R. da S. de. Por que as tarifas foram para os céus? Propostas para o setor elétrico brasileiro. Revista do BNDES, Rio de Janeiro, v. 14, n. 29, p. 435-474, Junho 2008.
- SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M. Power quality disturbance data compression using *wavelet* transform methods. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, Nº 3, Pag. 1250 a 1256. 1997.
- SHARMA, R.; SINGH, P. Islanding detection and control in grid based system using wavelet transform. IEE Power India Conference. Pag. 1 a 4. Dezembro. 2012.
- SILVA, A. J. S. R.; FILHO, A. L. O.; PEREIRA, L. A. C.; LIMA, L. C.; LAMBERT, N.; AMORIM, M. F. P.; AZEVEDO, G. P. Sage architecture for power system competitive environments. VI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica – VI SEPOPE. Salvador / BA. Maio, 1998.

- SILVA, A. P. G. da; SALVADOR, M. O que são sistemas supervisórios. Wectrus Sistemas de Automação Ltda. RT25.04. 20 de Dezembro. 2005.
- SILVA, P. A. S. da; ZIMMER, V.; DECKER, I. C.; AGOSTINI, M. N.; MANTELLI, F. M. Análise do Desempenho da Interligação AC-RO/SIN com a inserção da UHE Santo Antônio usando Sincrofasores. Artigo submetido ao XII SNPTEE. Brasília. 2013.
- SIQUEIRA, J. K. “Reconhecimento de Voz Contínua com Atributos MFCC, SSCH e PNCC, Wavelet Denoising e Redes Neurais”. Pontífice Universidade Católica – PUC. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Rio de Janeiro. Setembro, 2011.
- THEODORO, E. A. R.; BENEDITO, R. A. de S.; ALBERTO, L. F. C. Método Rápido Para Identificação de Ilhamento Em Sistemas Elétricos de Potência. XVIII Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2010. Bonito / MS. 12 a 16 de Setembro. 2010.
- TOLEDO, L. F. R. B.; LAZAZARETTI, A. E.; CAMPANELLI, L. V. A.; ROCHA, J. E. Classificação de Problemas de Qualidade de energia Utilizando a Transformada *Wavelet* Discreta. Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE). Santos/SP. 2007.
- TRUDNOWSKI, D. J.; JOHNSON, J.M.; HAUER, J. F. Making Prony Analysis More Accurate Using Multiple Signals. IEEE Transactions on Power Systems. Vol.14. N. 1. Pp.226-231. Fevereiro.1999.

-
- VIEIRA, J. C. M. Metodologias para ajuste e avaliação do desempenho de relés de proteção anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos. Tese de Doutorado. Departamento de Sistemas de Energia Elétrica. Universidade Estadual de Campinas. 2006.
- VIEIRA, J. C. M. et al. Um método prático para a definição dos ajustes de relés baseados em medidas de frequência usados para a detecção de ilhamentos de geração distribuída. SBA Controle & Automação, Natal, v. 19, n. 2, Abril 2008.
- VRIES, A. *WAVELETS*. M@th It. Arquivo capturado em 10 de Janeiro de 2013. Disponível em <http://www.math-it.org/Publikationen/Wavelets.pdf>
- XU, M.; MELNIK, R. V. N.; BORUP, U. Modeling anti-islanding protection devices for photovoltaic systems. Renewable Energy, Vol. 29. Nº 15. Pág. 2195 a 2216. Dezembro. 2004.
- ZANG, K.; YE, Y.; CHEN, L.; ZHANT, Y.; GARDER, R. M.; LIU, Y. FNET Observations of Low Frequency Oscillations in the Eastern Interconnection and Their Correlation with System Events. IEEE Power and Energy Society General Meeting. Pag 1 a 8. 24 a 29 de Julho. 2011.
- ZIN, A.A.M.; HAFIZ, H.M.; WONG, W.K. Static and dynamic under-frequency load shedding: a comparison. International Conference on Power System Technology -. PowerCon 2004. Vol.1. Pag. 941 a 945. 21 a 24 de Novembro. 2004.
- ZHENG, T.; MAKRAM, E. B.; GIRGIS, A. A. Power system transient and harmonic studies using *wavelet*

transform. IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. 14. October, 4. 1999.

ZHONGWEI, L.; LI, C.; WEIMING, T. Study on application of Morlet complex *wavelet* in digital protective relays. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. pag.1-4, 6-7. April, 2009.

ZIMMER, V.; JEREMIAS, T.; DECKER, I. C.; AGOSTINI, M. N. Detecção de perturbações sistêmicas usando dados de medição fasorial sincronizada. Congresso Brasileiro de Automática (CBA). Campina Grande/MG. 02 a 06 de Setembro, 2012.

APÊNDICE A – FREQUÊNCIA DO SISTEMA ELÉTRICO

A.1 Introdução

Algumas das grandezas elétricas básicas mais importantes, monitoradas e difundidas são a tensão, corrente, frequência, potência (ativa, reativa e aparente), resistência, indutância e capacitância. Cada uma dessas grandezas representa um comportamento de um componente ou de todo um sistema elétrico e é importante conhecê-los e mensurá-los, pois valores anormais dessas grandezas já são um indício de um problema iminente e assim pode-se tomar as devidas providências para tentar minimizar ou eliminar esses problemas iminentes.

A frequência elétrica é uma grandeza física e através dela tem-se a indicação da quantidade de ciclos a tensão e corrente elétrica completam em um segundo. Caso a frequência não esteja correta (num padrão nominal) os equipamentos podem não funcionar ou funcionar de modo incorreto (inadequado) e, em alguns casos, levando a um dano permanente ao equipamento, seja ele gerador, transformador ou carga.

Antes da introdução do sistema interligado nacional no Brasil não havia um padrão único de frequência. As empresas de eletricidade que estavam instaladas ou que estavam se instalando, utilizavam máquinas geradoras importadas da Europa ou dos Estados Unidos. Caso fosse importada da Europa, as máquinas funcionariam em 50 Hz e caso importado do EUA, 60 Hz.

Após esse período adotou-se como padrão a utilização da frequência de 60 Hz em todo o Brasil. O monitoramento da frequência, como já mencionado, é fundamental para saber da saúde do conjunto geração e carga. Em caso de anomalias, os relés, que são equipamentos destinados à proteção, entram em atuação com o intuito de eliminar essa anormalidade.

Para monitorar a frequência, os relés de frequência e taxa de variação de frequência foram (e em alguns lugares ainda são) os mais empregados, realizando a medição da frequência e também a taxa com que ela varia. Em um evento no qual há a queda de frequência, caso alguns esquemas como o controle automático de geração não consiga normalizar, um esquema especial de proteção é ativado - o esquema regional de alívio de carga, que tem por finalidade desligar um montante de carga suficiente para que possa voltar a ter um equilíbrio geração-carga.

A.2 Relés de Proteção

O equipamento principal destinado à proteção dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) é o relé. Os relés são sensores colocados no sistema que, quando há uma perturbação ou mesmo uma falta, atuam com a finalidade de isolar esse defeito.

Existem nos SEPs vários tipos de relés, cada um tendo sua funcionalidade específica, mas todos com o mesmo objetivo: detectar anormalidades no SEP no menor tempo possível e, dependendo da severidade da ocorrência, gerar alarmes através do sistema de controle para que sejam tomadas as devidas providências ou comandar automaticamente a abertura de disjuntores para que essa anormalidade seja extinta, causando menor impacto para as cargas conectadas ao sistema.

Os relés são primordiais para o monitoramento e proteção dos SEPs, pois reduzem os riscos de um defeito se propagar para outros equipamentos, mantendo a integridade e a vida útil dos demais equipamentos.

Há vários tipos de relés, que são classificados de acordo com sua tecnologia em:

- Relés eletromecânicos;
- Relés estáticos (eletrônicos);
- Relés digitais (numéricos).

Todos esses relés possuem os mesmos objetivos, descritos nos parágrafos anteriores. A Figura A.1 mostra exemplos de relés eletromecânicos.



Figura A.1 – Relés Eletromecânicos.

Na tecnologia eletromecânica cada relé efetua uma função de proteção específica, mas na tecnologia digital um único relé realiza diversas funções (relé multifuncional). A ANSI (*American National Standards Institute*), através da

norma C37-2 da IEEE padronizou a identificação das funções (que um relé pode executar) através de numeração. A numeração facilita, por exemplo, na identificação em diagramas, assim como ajuda a simplificar na descrição do emprego dos relés, bastando apenas inserir o número do dispositivo.

Para o monitoramento da frequência da rede e a proteção do SEP para eventos como detecção de ilhamento, os relés comumente utilizados são os de sobrefrequência, subfrequência e taxa de variação de frequência. O item A.3 descreve o princípio básico dos relés de sobrefrequência e subfrequência enquanto que o item A.4 descreve o relé de taxa de variação de frequência.

A.3 Relé de Sobrefrequência e Subfrequência

Esse tipo de relé tem o funcionamento básico representado em diagrama de blocos na Figura A.2. Fonte: (VIEIRA, *et al.*, 2008).

A frequência do sistema passa por uma filtragem de sinal para remoção de componentes de alta frequência que possam atrapalhar o relé (VIEIRA *et al.*, 2008). Após o sinal filtrado é comparado com os valores F_{sup} e F_{inf} . Caso a frequência do sistema seja maior que F_{sup} ou menor que F_{inf} e a tensão do sistema seja maior que V_{min} é dado o sinal de disparo.

É importante a monitoração da frequência, pois caso a frequência caia abaixo de 56 Hz (o que dá cerca de 6% da frequência nominal no caso do Brasil) os geradores acionados por turbinas a vapor passarão a trabalhar na faixa de frequência de ressonância mecânica, o que pode ocasionar em ruptura e posterior quebra das palhetas (CAMINHA, 1983)

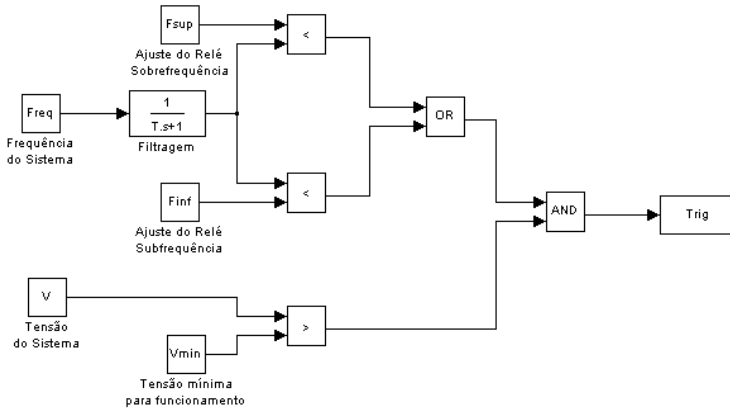


Figura A.2 – Representação do relé de sobrefrequência e subfrequência.

Os relés de frequências, em sua maioria, são equipados com elemento que observa a tensão do sistema, que bloqueia o funcionamento do relé caso a magnitude de tensão estiver abaixo do determinado por V_{inf} . Esse procedimento serve, usualmente, para evitar que uma partida do gerador possa fazer com que o relé opere indevidamente.

A.4 Relé de Taxa de Variação de Frequência

Esse relé, também chamado de *ROCOF Relay (Rate of Change of Frequency Relay)*, pode ser usado para avaliar mais rapidamente a detecção de ilhamento do sistema, pois usa como sinal de entrada a taxa de variação de frequência.

A Figura A.3, fonte: (VIEIRA, *et al.*, 2008), mostra o diagrama de blocos de um relé de taxa de variação de frequência.

Como mencionado, o relé recebe como sinal de entrada a taxa de variação de frequência (através do bloco df/dt), passando em seguida por um filtro para eliminar possíveis transitórios de alta frequência. O sinal filtrado é comparado com o valor de ajuste do relé. Caso a taxa de variação de frequência for maior que o ajuste do relé “Tajuste” e se a

tensão do sistema for maior que o valor mínimo ajustado em V_{min} é efetuado o sinal de disparo.

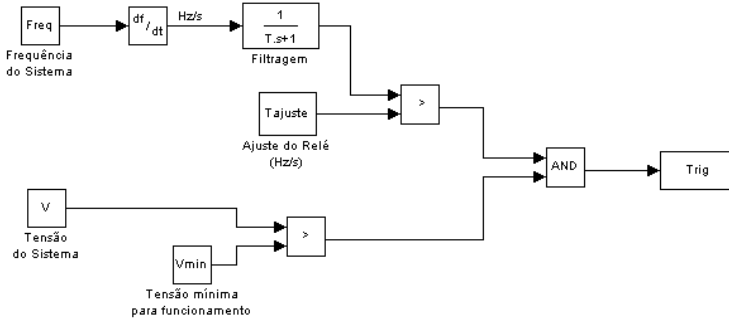


Figura A.3 – Diagrama de blocos do Relé de Taxa de variação de Frequência.

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DO CÓDIGO IMPLEMENTADO

B.1 – Introdução

O programa foi escrito na linguagem de programação própria do Matlab. Algumas das muitas vantagens proporcionadas ao se utilizar o Matlab para esse tipo de finalidade são a realização de operações matemáticas com vetores e matrizes de modo ágil, as bibliotecas de funções já existentes e disponíveis para sua utilização, muita semelhança da sua linguagem de programação com as linguagens C e C++, a de detectar e apontar erros, além de muitas outras vantagens e facilidades. Foi utilizado o recurso GUI layout editor, que permite a programação com interface gráfica dentro do próprio Matlab, permitindo a criação de um ambiente visual, facilitando a disponibilização de suas funções para um usuário qualquer.

Visando essas características e associando com a necessidade de juntar a ferramenta *Wavelet* com os fasores da SFMS, o Matlab se torna apropriado para esse desenvolvimento.

B.2 – Pré-Processamento

O pré-processamento é executado no instante em que o aplicativo é chamado pelo DFAM. As variáveis, vetores, e funções utilizadas são apresentadas na Tabela B.1:

Tabela B.1 – Variáveis e funções utilizadas no pré-processamento.

Nome	Tipo
terminal_nome_id	vetor de <i>strings</i>
qtde_dados	variável do tipo inteiro
geral_spms	Função nativa do DFAM
atuacao_tempo	Matriz de tamanho $2 \times 5 \times n^{\circ}$ PMUs
atuacao_freq	Matriz de tamanho $2 \times 5 \times n^{\circ}$ PMUs

É executada nessa parte a captação do nome das PMUs e a identificação de quais delas contém dados disponíveis através do vetor de *strings* “terminal_nome_id”.

A variável “qtde_dados” armazena o nº de pontos existentes em cada variável elétrica disponível (tensão, corrente, frequência, diferença angular) de cada PMU, sendo que o número é igual para cada uma destas variáveis, já que este programa analisa uma consulta prévia com um tempo pré-determinado pela própria consulta.

A função “geral_spms” é uma função nativa do DFAM que, dentre outras aplicações, é responsável por arrumar os valores de tempo de UTC para o horário oficial de Brasília (e levando em consideração se está no horário brasileiro de verão ou não).

A matriz “atuação_tempo” é uma matriz de pontos flutuantes que será responsável por armazenar os valores de tempo em que ocorrerão as detecções (tanto teórico quanto o detectado pela *wavelet*). Essa matriz possui 3 dimensões, sendo:

1. A primeira dimensão composta por 2 linhas, onde a primeira linha armazenará os dados da detecção do ERAC e a segunda linha do retorno da frequência ao mesmo patamar da atuação.
2. A segunda dimensão composta por 5 colunas, onde cada uma delas corresponde a cada nível (estágio) de atuação do ERAC;
3. A terceira dimensão corresponde a cada uma das PMUs em atividade e que possuam dados disponíveis na consulta realizada.

A Figura B.1 mostra como estão disponibilizados cada uma das três dimensões da matriz “atuação_tempo”.

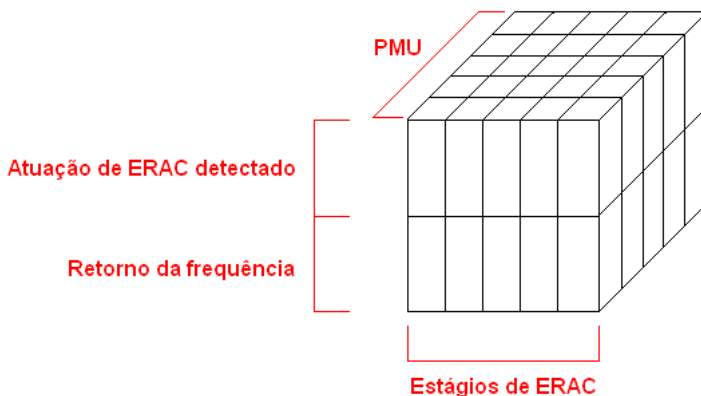


Figura B.1 – Matrizes atuacao_tempo e atuacao_freq.

A matriz “atuacao_frequencia” é uma matriz muito semelhante à “atuacao_tempo”, com a mesma disposição dos dados e com a única diferença de armazenar os valores absolutos de frequência em cada estágio do ERAC. A Figura B.1 também serve como ilustração para a disponibilização desta matriz.

B.2.1 - Inicializando

Essa parte inicial do código é executada logo após ser escolhido a PMU para analisar e clicar no botão “Iniciar” dentro do “Ambiente de Dados” (Figura 3.21).

As variáveis e vetor associados a esta etapa são mostradas na Tabela B.1.

Tabela B.2 – Variáveis e funções utilizadas no Iniciar do Algoritmo.

Nome	Tipo
pmu	Variável do tipo inteiro
detectar_local_pmu	Variável do tipo <i>string</i>
freq	Vetor do tipo ponto flutuante

A variável “pmu” armazena o número de identificação (*id number*) da PMU selecionada. Essa variável é responsável

por apontar qual das PMUs se deve extrair as informações necessárias para o programa.

A variável “detectar_local_pmu” é executado logo após ser armazenado o *id* da PMU selecionada na variável “pmu”. O programa procura em qual região elétrica está localizado essa PMU e então armazena o nome da região nesta variável. Atualmente os possíveis nomes para armazenamento são:

1. Sul;
2. Sudeste;
3. Norte;
4. Nordeste;
5. Acre-Rondônia.

Assim que as duas variáveis acima receberam os valores apropriados, chega a vez do vetor “freq”. Este vetor recebe e armazena os valores da frequência da PMU selecionada para iniciar o processamento.

B.2.2 - Valores teóricos

Essa parte do código é responsável por localizar e armazenar os valores referentes à atuação de cada um dos estágios do ERAC, caso tenha ocorrido alguma atuação. A Tabela B.3 apresenta as funções associadas aos Valores Teóricos.

Como se trata de apenas localização para realizar uma comparação com a metodologia desenvolvida neste trabalho, nesta parte do código é feito uma varredura ponto a ponto a fim de localizar o instante de tempo em que foi atingida a frequência em cada um dos estágios do ERAC.

A função “marcar_atuacao_teorico” realiza a varredura ponto a ponto em todo o sinal de frequência da PMU escolhida e compara os valores de frequência com os tabelados de acordo com a região elétrica pertencente esta PMU. Ao atingir um

valor no qual teoricamente deve haver atuação de um estágio do ERAC, essa função armazena o valor do tempo em que foi alcançado essa frequência.

Semelhantemente à função “marcar_atuacao_teorico”, a função “marcar_retorno_teorico” faz a varredura a partir do ponto de atuação do ERAC para armazenar o valor no tempo em que houve o retorno da frequência para o mesmo valor (isso caso houver retorno).

Tendo os valores em que houve a queda de frequência a valores em que se deve atuar o ERAC e posteriormente o retorno da frequência para o mesmo valor, a função “tracejado_entre_atuacoes” é responsável por mostrar graficamente esses valores, auxiliando o usuário a observar o tempo em que houve essa excursão de frequência abaixo de cada patamar de estágio do ERAC.

Tabela B.3 – Variáveis e funções utilizadas em Valores Teóricos.

Nome	Tipo
marcar_atuacao_teorico	Função
marcar_retorno_teorico	Função
tracejado_entre_atuacoes	Função
minimos_alcancados	Função

B.2.3 - Transformada *Wavelet* Discreta

Nesta etapa ocorre a parte principal do programa, a execução da ferramenta de processamento do sinal de entrada, a Transformada *Wavelet* Discreta. A TWD foi descrita no item 2.5.6 enquanto que a Tabela B.4 apresenta as variáveis, vetores e matrizes utilizadas durante a execução deste procedimento.

A variável “tamanho_buffer” armazena o tamanho da janela de dados a ser utilizado durante a execução da TWD e por padrão está configurado para que a janela tenha o tamanho de 512 dados.

A variável “niveis_iteracao” armazena o número de iterações da TWD a ser realizada. Por padrão está configurado para realizar 4 iterações.

O vetor “h” contém o valores do filtro digital passa alta da *wavelet* a ser utilizada para o TWD enquanto que o vetor “g” contém os valores do filtro digital passa baixa. Cabe salientar que ambos os vetores possuem tamanhos iguais.

A matriz “matrizW” é uma matriz quadrada de tamanho igual ao valor armazenado em “tamanho_buffer”. Sua montagem é explicada no item 2.5.6 através da equação (2.10).

A matriz “ca” é uma matriz retangular, onde cada linha representa os valores do coeficiente de aproximação adquiridos em cada iteração da TWD. De forma semelhante, a matriz “cd” também é uma matriz retangular, entretanto são armazenados em cada linha dessa matriz os valores do coeficiente de detalhamento de cada iteração.

Tabela B.4 – Variáveis, vetores e matrizes utilizadas na TWD.

Nome	Tipo
tamanho_buffer	Variável do tipo inteiro
niveis_iteracao	Variável do tipo inteiro
h	Vetor do tipo ponto flutuante
g	Vetor do tipo ponto flutuante
matrizW	Matriz quadrada de 2 dimensões
ca	Matriz retangular de 2 dimensões
cd	Matriz retangular de 2 dimensões

B.2.4 - Detecção e análise

Após a execução de todas as iterações da TWD e feito o devido armazenamento dos coeficientes de detalhamento, entra-se no processo de detecção dos pontos que deverão sofrer um processo de análise para geração do relatório automatizado.

Durante esse processo são utilizados as variáveis e vetores mostradas na Tabela B.5

Tabela B.5 – Variáveis e matrizes utilizadas na detecção e análise.

Nome	Tipo
deteccao	Vetor do tipo inteiro
atuacao_freq_real	Matriz do tipo ponto flutuante
atuacao_tempo_real	Matriz do tipo ponto flutuante
detectado_abertura	Variável do tipo inteiro
detectado_retorno	Variável do tipo inteiro

A ferramenta utilizada para detecção dos pontos para análise é a *Hard Wavelet Threshold* (HWT), descrita no item 2.6, que cria, utilizando a equação (2.12), o vetor “deteccao”, que armazena o endereço dos pontos em que o HWT apontou para serem analisadas.

Tão logo que é finalizado a criação do vetor “deteccao”, é realizada então a análise destes pontos observando e comparando-os com as tabelas de frequência do ERAC

B.2.5 - Relatórios de Resultados

Finalizado a etapa de detecção e análise, os resultados adquiridos serão mostrados ao usuário nesta etapa. As variáveis e matrizes utilizados aqui são os mesmos da Tabela B.5 além de mais uma função apresentada na Tabela B.6.

Tabela B.6 – Função utilizada no Relatório de Resultados.

Nome	Tipo
OTBX_prony_mono	Função

A função “OTBX_prony_mono” é utilizada caso, durante a análise efetuada no item 0 seja detectado um restabelecimento da interligação. É efetuado no trecho em que há o restabelecimento da interligação uma análise da oscilação eletromecânica para ser apresentado na Figura 3.23. Figura 3.23 – Análise da oscilação eletromecânica pelo método de Prony. A análise pelo método de Prony é apresentada no Anexo I deste trabalho.

ANEXO I - MÉTODO DE PRONY

O Método de Prony, criado pelo francês Gaspard Clair François Marie Riche de Prony (†1839). Este método é aplicado em dados reais do SMFS no DFAM e as notações utilizadas na descrição do método neste Anexo foi baseado no trabalho de Liu *et al.* (2007) e adaptado de Jeremias (2012), embora existam muitos trabalhos que descrevem matematicamente o Método de Prony, como Hauer *et al.* (1990), Trudnowski (1999) e Santos (2008).

A equação (I.1) decompõe o sinal medido como sendo produto entre os polos λ e resíduos R , em que n é a ordem do modelo e N é o total de pontos em análise. A equação (I.1) pode ser representado matricialmente, conforme a equação (I.2).

$$y(k) = \sum_{i=1}^n R_i \lambda_i^k \quad k = 0 \dots N - 1 \quad (\text{I.1})$$

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \dots & \lambda_n^{N-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (\text{I.2})$$

O sinal de saída do qual se deseja extrair os modos de oscilação é o resultado da aplicação de um impulso na entrada de um sistema com função de transferência dada por (I.3), que relaciona a entrada com a saída.

$$G(z) = \frac{N(z)}{z^n - (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_n z^0)} \quad (\text{I.3})$$

Os polos da função de transferência são obtidos utilizando a equação (I.4).

$$z^n - (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_n z^0) = 0 \quad (\text{I.4})$$

Para obter os coeficientes a da equação (I.4), deve-se multiplicar a equação (I.2) pelo vetor da equação (I.5).

$$[-a_n \quad -a_{n-1} \quad \cdots \quad -a_1 \quad 1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0] \quad (\text{I.5})$$

Chega-se então na relação dada em (I.6). O lado direito desta igualdade é zero devido à (I.4) para determinação dos polos.

$$[-a_n \quad -a_{n-1} \quad \cdots \quad -a_1 \quad 1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{I.6})$$

A mesma igualdade de (I.6) ocorrerá quando a multiplicação for feita com os vetores (I.7) e (I.8):

$$[0 \quad -a_n \quad -a_{n-1} \quad \cdots \quad -a_1 \quad 1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0] \quad (\text{I.7})$$

$$[0 \quad 0 \quad -a_n \quad -a_{n-1} \quad \cdots \quad 1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0] \quad (\text{I.8})$$

Realizando recursivamente tais multiplicações até o vetor $[0 \quad 0 \quad \cdots \quad -a_n \quad -a_{n-1} \quad 1]$, é possível reescrever estas igualdades utilizando a equação (I.9) e encontrar os valores dos coeficientes a através da solução desta equação.

$$\begin{bmatrix} y(n) \\ y(n+1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(n-1) & y(n-2) & \cdots & y(0) \\ y(n) & y(n-1) & \cdots & y(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-2) & y(N-3) & \cdots & y(N-n-1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (\text{I.9})$$

Conhecidos os coeficientes a , os valores dos polos λ_i ($i = 1, \dots, n$) são encontrados a partir da equação I.4 e os valores de frequência, amortecimento, amplitude e fase são obtidos a partir destes polos, utilizando a metodologia apresentado na Tabela I.1 (JEREMIAS, 2012).

Tabela I.1 – Metodologia do cálculo de Prony.

Descrição	Contínuo	Discreto
Frequência (f)	$f_i = \frac{Im(\lambda_{si})}{2 \cdot \pi}$	$f_i = \frac{z \cdot \lambda_{zi}}{2 \cdot \pi \cdot T}$
Amortecimento (ξ)	$\xi_i = -\frac{real(\lambda_{si})}{ \lambda_{si} }$	$\xi_i = -\frac{real(\ln(\lambda_{zi}))}{ \ln(\lambda_{zi}) }$
Resíduos (R)	$y(t) = \sum_{i=1}^n R_i \cdot e^{\lambda_{si} \cdot t}$	$y[k] = \sum_{i=1}^n R_i \cdot \lambda_{zi}^k$
Amplitude (Am)	$Am_i = R_i $	
Fase (Φ)	$\Phi_i = \hat{\text{ângulo}} R_i $	
Energia (E)	$E_i = \int e^{-\xi_i \cdot 2\pi \cdot f_i \cdot t} \cdot Am_i \cdot sen(2\pi \cdot f_i \cdot t + \Phi_i)$	
$i = 1 \dots n$, em que n é a ordem do modelo $k = 0 \dots N - 1$, em que N é a quantidade de pontos do intervalo		

ANEXO II – COEFICIENTES DAUBECHIES

D2	D4	D6	D8	D10	D12	D14	D16	D18	D20
1	0.6830127	0.47046721	0.32580343	0.22641898	0.15774243	0.11009943	0.07695562	0.05385035	0.03771716
1	1.1830127	1.14111692	1.01094572	0.85394354	0.69950381	0.56079128	0.44246725	0.34483430	0.26612218
	0.3169873	0.650365	0.8922014	1.02432694	1.06226376	1.03114849	0.95548615	0.85534906	0.74557507
	-0.183013	-0.1909344	-0.0395750	0.19576696	0.44583132	0.66437248	0.82781653	0.92954571	0.97362811
		-0.1208322	-0.2645072	-0.3426567	-0.31998660	-0.20351382	-0.02238574	0.18836955	0.39763774
		0.0498175	0.0436163	-0.0456011	-0.18351806	-0.31683501	-0.40165863	-0.41475176	-0.35333620
			0.0465036	0.10970265	0.13788809	0.1008467	6.681941e-4	-0.13695355	-0.27710988
			-0.0149870	-0.0088268	0.03892321	0.11400345	0.18207636	0.21006834	0.18012745
				-0.0177919	-0.04466375	-0.05378245	-0.02456390	0.04345268	0.13160299
				4.7175e-3	7.832512e-4	-0.02343994	-0.06235021	-0.09564726	-0.10096657
					6.756062e-3	0.01774979	0.01977216	3.548928e-4	-0.04165925
					-1.52353e-3	6.075150e-4	0.01236884	0.03162417	0.04696981
						-2.54790e-3	-6.88772e-3	-6.67962e-3	5.100437e-3
						5.002265e-4	-5.54004e-4	-6.05496e-3	-0.01517900
							9.552297e-4	2.612967e-3	1.973325e-3
							-1.66137e-4	3.258147e-4	2.817687e-3
								-3.56330e-4	-9.69948e-4
								5.564551e-5	-1.64709e-4
									1.323544e-4
									-1.87584e-5

Tabela II.1 - Coeficientes Daubechies.

