

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

Thiago Jeremias

**Implementação e Análise de Metodologias de  
Identificação de Oscilações Eletromecânicas em um  
Ambiente de Aplicativos para Sincrofasores**

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

Orientador: Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc;

Florianópolis  
Outubro, 2012

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

Jeremias, Thiago

Implementação e Análise de Metodologias de Identificação de Oscilações Eletromecânicas em um Ambiente de Aplicativos para Sincrofasores [dissertação] / Thiago Jeremias ; orientador, Ildemar Cassana Decker - Florianópolis, SC, 2012.

214 p. ; 21cm

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

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada. 3. Aplicativos para Sincrofasores . 4. Identificação de Oscilações Eletromecânicas. I. Decker, Ildemar Cassana. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Thiago Jeremias

**Implementação e Análise de Metodologias de  
Identificação de Oscilações Eletromecânicas em um  
Ambiente de Aplicativos para Sincrofasores**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica

Florianópolis, 10 de Outubro de 2012.

---

Prof. Patrick Kuo Peng, D.Sc  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc.  
Orientador

---

Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.

---

Prof. Flávio Antonio Becon Lemos, D.Eng

---

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D



Aos meus pais...



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade que me foi dada e principalmente pela saúde e força de vontade que me levou a chegar até aqui. A meus pais Anerino e Elizabete que sempre me apoiaram e me ajudaram nesta conquista, sendo os grandes professores de minha formação como pessoa. Meus irmãos, Gladimir, Robson e Charles por todo o apoio e incentivo, suas esposas Marici, Kátia e Fabiana, aos meus sobrinhos Mateus, Eduardo, Gustavo e Manuela.

Agradeço também aos amigos que permaneceram em minha cidade torcendo pelo meu sucesso, aos amigos e colegas de LabPlan, em especial ao grupo do Projeto MedFasee pelo auxílio nos desenvolvimentos deste trabalho, aos amigos de graduação e hoje companheiros de profissão. Estendo esse agradecimento a todos os professores que foram os grandes responsáveis por essa conquista.

Aos professores Ildemar Cassana Decker, Aguinaldo S. e Silva e ao engenheiro Marcelo Neujahr Agostini pelas orientações e contribuições no desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço as Empresas Reason Tecnologia, CTEEP, ONS e a UFSC, CNPq e FINEP pelo incentivo ao desenvolvimento do Projeto MedFasee. À CELESC Distribuição na qual hoje faço parte e colegas da Divisão de Eficiência Energética.

E um agradecimento especial a minha namorada Narceli que esteve ao meu lado esse tempo todo nos momentos alegres, nos momentos estressantes e também por suas significativas contribuições nesse trabalho.



“Vamos passo a passo, mas sempre em frente”.  
(Santa Paulina)



## RESUMO

Neste trabalho é descrito um ambiente de desenvolvimento de aplicativos para o processamento de dados fasoriais provenientes de SPMS, destinado à prototipação de metodologias e análise do desempenho do Sistema Interligado Nacional. O ambiente computacional, denominado DFAM, foi desenvolvido em Matlab® e possui funcionalidades como: análise em regime permanente, análise de ocorrências, qualidade de energia elétrica, identificação e detecção de eventos e estudos de oscilações eletromecânicas. Este ambiente tem sido amplamente utilizado no âmbito do Projeto MedFasee (LabPlan/UFSC), na realização de estudos do SIN e tem permitido o desenvolvimento de diversos outros trabalhos científicos.

Fazem parte deste trabalho, a avaliação do desempenho de métodos de identificação de oscilações eletromecânicas, sendo estes os métodos de Prony, HTLS, Feixe de Matrizes, N4SID, Realização Balanceada Estocástica e Wiener-Hopf. Para uma adequada utilização destes métodos em sincrofasores são sugeridos ajustes nos parâmetros, tais como: ordem do modelo, tamanho da janela e dimensão das matrizes de dados. A demonstração deste ambiente computacional e avaliação das metodologias são feitas utilizando dados monitoradas pelo SPMS MedFasee BT de três grandes ocorrências no SIN. A primeira perturbação escolhida ocorreu em 10/02/2011 em que o SIN é separado em três subsistemas. Com esta ocorrência mostrou-se a efetividade das metodologias e dos ajustes de parâmetros aplicados em situações de *ringdown*, juntamente com a validação do cálculo das formas modais. O segundo evento ocorreu em 02/09/2011 envolvendo a UHE de Itaipu, com rejeição de carga de 5.100 MW desta usina. Com este evento, confirmam-se a eficiência dos métodos para *ringdown* e avaliam-se os métodos para processamento de dados ambientes. Os resultados encontrados foram satisfatórios, com destaque para o desempenho do método RBE que apresentou melhores resultados, com pouco esforço computacional. O terceiro evento analisado são de oscilações sustentadas que se mantiveram dos dias 05 a 09/05/2012 quando na região do Mato Grosso do Sul. Com este evento mostra-se a eficiência do método DFT aplicadas a dados ambientes, podendo ser estendida para monitoramento em tempo real.

Palavras-Chave: Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada, Aplicativos para Sincrofasores, Identificação de Oscilações Eletromecânicas.



## ABSTRACT

This work describes an environment for developing applications for the processing of synchrophasors data, for the methodologies prototyping and performance analysis of the Brazilian Interconnected Power System. The computational environment called DFAM, was developed in Matlab ® and it has features such as: steady state analysis, events analysis, power quality analysis, detection and identification of events and eletromechanical oscillations analysis. The DFAM have been used to conduct studies of the Brazilian Interconnected Power System (BIPS), and it have permitted develop new methodologies uder the MedFasee Project (LabPlan/UFSC).

Also as part of this work, has been evaluated the performance of methods for identification of electromechanical oscillations, which are the methods of Prony, HTLS, Matrix Pencil, N4SID, Balanced Stochastic Realization and Wiener-Hopf. For a proper use of these methods in synchrophasor are suggested adjustments to parameters such as: model order, the window size and dimension of the data matrix. The demonstration of this computing environment and the evaluation methodologies have made using data monitored by Low Voltage SPMS MedFasee of three major occurrences on BIPS. The first chosen disturbance occurred on Feb 02, 2010 wherein the BIPS was separated into three subsystems. With this occurrence was demonstrate the effectiveness of methods and parameter settings applied in rindgdown situations, along with the validation of the calculation of mode shapes. The second event occurred on Sept 02, 2011 involving the Itaipu Hydroelectric Power Plant, with load shedding of 5,100 MW from this plant. In this event was confirmed the efficiency of the methods for ringdown and was evaluated the methods for processing ambient data. The results were satisfactory, with emphasis on the performance of the RBE method that showed better results, with little computational effort. The third event analysed are permanent oscillations during the days May 05-09, 2012 in the Mato Grosso do Sul. With this event was showed the efficiency of the DFT method applied to ambient data, and was indicated that this method can be extended to monitoring in real time

**Keywords:** Synchronized Phasor Measurement Systems, Applications for Synchrophasor Processing, Eletromechanical Oscillations Identification



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Mapa do SIN. (ONS, 2012).....	28
Figura 1.2 – Percentual de capacidade instalada por tipo de fonte. (ONS, 2011). .....	28
Figura 1.3 – Áreas tecnológicas principais.....	29
Figura 1.4 – Sistema de medição Fasorial Sincronizada – SPMS.....	32
Figura 1.5 – Evolução do SPMS MedFasee BT. ....	36
Figura 1.6 – SPMS MedFasee BT [www.medfasee.ufsc.br/temporeal] .....	36
Figura 1.7 – SPMS MedFasee Eletrosul. ....	37
Figura 1.8 – SPMS MedFasee CTEEP. (Decker <i>et al.</i> , 2011). ....	39
Figura 1.9 – Aplicações da medição fasorial sincronizada. ....	40
Figura 2.1 – Módulos de análise do DFAM.....	50
Figura 2.2 – Componentes simétricas. Sequência positiva, negativa e zero. ....	52
Figura 2.3 – Fluxo de potência em uma LT, .....	55
Figura 2.4 – Representação de LT por um quadripolo.....	56
Figura 2.5 – Modelo $\pi$ trifásico de uma LT.....	57
Figura 2.6 – Modelo $\pi$ de sequência positiva de uma LT.....	57
Figura 2.7 – Janela de abertura do DFAM.....	62
Figura 2.8 – Sobre.....	64
Figura 2.9 – Janela de funcionalidades. ....	64
Figura 2.10 – Lista de aplicativos externos.....	66
Figura 2.11 – Diagrama de Bode do Filtro de 5 Hz elíptico. ....	67
Figura 3.1 – Representação do modelo linear de um sistema dinâmico. (Vanfretti <i>et al.</i> , 2011) .....	73
Figura 3.2 – Oscilação amortecida.....	74
Figura 3.3 – Formas modais para representar o modo da Figura 3.2. ....	77
Figura 3.4 – Modos de oscilação interárea do SIN. ....	78
Figura 3.5 – Fluxo de potência ativa LT 500 kV Serra da Mesa – Samambaia (norte-sul). ....	79
Figura 3.6 – Defasagem angular UNB (Brasília – DF) x UFPA (Belém – PA). 79	79
Figura 3.7 – Classificação dos métodos.....	80
Figura 3.8 – Sistema massa-mola. ....	81
Figura 3.9 – Resposta do sistema massa-mola. ....	82
Figura 3.10 – Aplicação da DFT.....	84
Figura 3.11 – Modelo de função de transferência com filtro Wiener. ....	84
Figura 4.1 – a) Sinal reamostrado. b) Espectro de frequências.....	111
Figura 4.2 – DFT sem <i>Aliasing</i> . ....	112
Figura 4.3 – Análise de sinais por janelas deslizantes. ....	115
Figura 4.4 – Aplicação dos métodos.....	116
Figura 4.5 – DFT com janelas deslizantes. ....	117
Figura 4.6 – Sinal de entrada para a DFT, com janela retangular. ....	118
Figura 4.7 – Sinal criado com 0,25 e 0,8 Hz.....	119
Figura 4.8 – DFT para uma janela de 10s. ....	119
Figura 4.9 – DFT para janela de 8s.....	120

Figura 4.10 – DFT para Janela de 20s. ....	120
Figura 4.11 – Sistema teste implementado em Matlab/Simulink®.....	129
Figura 4.12 – Sinais de saída simulados. ....	130
Figura 5.1 – Áreas isoladas do SIN. ....	136
Figura 5.2 – Visão geral da ocorrência em termos de frequência no SIN.....	136
Figura 5.3 – Detalhes do início da ocorrência .....	137
Figura 5.4 – Tensões trifásicas na UnB (Brasília – DF). ....	138
Figura 5.5 – Frequência no SIN.....	140
Figura 5.6 – Eventos 1 a 3. ....	140
Figura 5.7 – Evento 4. ....	141
Figura 5.8 – Tensões de sequência positiva.....	142
Figura 5.9 – Diferenças angulares. Referência; UFSC (Florianópolis-SC). ....	143
Figura 5.10 – Separação do SIN e recomposições.....	145
Figura 5.11 – Oscilações no sul, sudeste e centro-oeste. ....	145
Figura 5.12 – Espectro de frequências. Janela 88 a 98 s.....	146
Figura 5.13 – Formas modais para o modo de 0,64 Hz. ....	147
Figura 5.14 – Oscilação no norte e nordeste.....	148
Figura 5.15 – Espectro de frequências. Janela 860 a 872 s.....	148
Figura 5.16 – Formas modais para o modo de 0,49 Hz. ....	149
Figura 5.17 – Oscilações no norte e sul. ....	150
Figura 5.18 – DFT. Janela 3612 a 3640.....	151
Figura 5.19 – Formas modais para o modo de 0,22 Hz. ....	152
Figura 5.20 – Oscilações no SIN (Ocorrência). ....	153
Figura 5.21 – Observação da estacionariedade.....	154
Figura 5.22 – Diferença angular UNIR x UFMT.....	156
Figura 5.23 – Frequência no SIN (um terminal por região).....	157
Figura 5.24 – Espectro de frequências.....	158
Figura 5.25 – Formas modais: modo norte – sul. Prony(esq.) e HTLS (dir.) ..	160
Figura 5.26 – Filtragem passa-faixa (0,3-0,4 Hz).....	160
Figura 5.27 – Formas modais: modo sul-sudeste. Prony(esq.) e HTLS (dir.)..	161
Figura 5.28 – Filtragem passa-faixa (0,65-0,75 Hz).....	161
Figura 5.29 – Formas modais: modo 3. Prony(esq.) e HTLS (dir.) .....	162
Figura 5.30 – Filtragem passa-faixa (0,55-0,65 Hz). ....	162
Figura 5.31 – Defasagem angular entre UFPA e UNB.....	164
Figura 5.32 – Frequência e amortecimento do modo norte-sul, por RBE.....	165
Figura 5.33 – Frequência e amortecimento do modo norte-sul, por N4SID. ....	166
Figura 5.34 – Frequência no SIN.....	168
Figura 5.35 – Programa MDF – sinalização de oscilação próximo 0,6 Hz.....	170
Figura 5.36 – Programa MDF – Espectro de Frequências (DFT).....	170
Figura 5.37 – Início da oscilação. ....	171
Figura 5.38 – Início da oscilação sustentada. ....	171
Figura 5.39 – Detalhe da oscilação.....	172
Figura 5.40 – DFT: dia 05/05/2012. ....	172
Figura 5.41 – Frequência e amortecimento da oscilação. ....	173
Figura 5.42 – DFT: 06/05/2012.....	174

Figura 5.43 – DFT: 07/05/2012 .....	174
Figura 5.44 – Termina das oscilações pouco amortecidas .....	175
Figura 5.45 – Espectro de frequências .....	175
Figura 5.46 – Frequência e amortecimento da oscilação (período final) .....	176



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características das oscilações. ....	75
Tabela 3.2 – Níveis de segurança em relação ao amortecimento. ....	77
Tabela 3.3 – Modos Interárea no SIN. (ONS) .....	78
Tabela 4.1 – Taxa de amostragem. ....	113
Tabela 4.2 – Janelas de tempo. ....	114
Tabela 4.3 – Componentes do sinal. ....	118
Tabela 4.4 – Ajustes para o Método de Prony. ....	122
Tabela 4.5 – Ajustes para o método HTLS. ....	124
Tabela 4.6 – Ajustes para o Método Feixe de Matrizes. ....	125
Tabela 4.7 – Ajustes para o Método N4SID. ....	126
Tabela 4.8 – Ajustes para o Método RBE. ....	127
Tabela 4.9 – Ajustes para o método de Wiener-Hopf. ....	127
Tabela 4.10 – Síntese dos ajustes dos parâmetros. ....	128
Tabela 4.11 – Modos selecionados. ....	129
Tabela 4.12 – Detecção modo 1: 0,35 Hz – 13%. ....	131
Tabela 4.13 – Detecção modo 2: 0,67 Hz – 3%. ....	131
Tabela 4.14 – Prony, HTLS e Feixe de Matrizes em dados ambiente. ....	132
Tabela 5.1 – Eventos observados. ....	137
Tabela 5.2 – Eventos notados. ....	141
Tabela 5.3 – Ajustes do ERAC AC/RO. ....	141
Tabela 5.4 – Modos Interárea no SIN. ....	143
Tabela 5.5 – Oscilação no sul, sudeste e centro-oeste. ....	146
Tabela 5.6 – Oscilação no norte e nordeste. ....	149
Tabela 5.7 – Oscilação no norte e sul. ....	151
Tabela 5.8 – Resumo dos resultados. ....	152
Tabela 5.9 – Aplicação incorreta dos métodos. ....	155
Tabela 5.10 – Oscilação no Subsistema AC/RO. ....	156
Tabela 5.11 – Frequências e amortecimento no religamento de Itaipu. ....	158
Tabela 5.12 – Análise via Método Feixe de Matrizes. ....	159
Tabela 5.13 – Comparação entre RBE, N4SID e Wiener-Hopf. ....	168
Tabela 5.14 – Comparação entre RBE, N4SID e Wiener-Hopf. ....	175



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AC/RO	Acre/Rondônia
AT	Alta Tensão
BPA	<i>Bonneville Power Administration</i>
BT	Baixa Tensão
CAG	Controle Automático de Geração
CCA	<i>Canonical Correlation Analysis</i>
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
ERAC	Esquema Regional de Alívio de Carga
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems</i>
FINEP	Financiadora de Estudos e Pesquisas
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
IPDO	Informativo Preliminar Diário de Operação
LT	Linha de Transmissão
MAE	Mercado Atacadista de Energia
N4SID	Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification
NASPI	<i>North American SynchroPhasor Initiative</i> )
ONS	Operador Nacional do Sistema
PDC	<i>Phasor Data Concentrator</i>
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSS	<i>Power System Stabilizer</i>
PU	Por Unidade
RBE	Realização Balanceada Estocástica
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SCE	<i>Southern California Edison</i>
SE	Subestações
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SPMS	<i>Synchronized Phasor Measurement System</i> (Sistema de Medição Fasorial Sincronizada)
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i>
TC	Transformador de Corrente

TP	Transformador de potencial
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
WAMPACS	<i>Wide-area Measurement Protection and Control System</i>
WAMS	<i>Wide-area Measurement System</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
1.1	OBJETIVOS	30
1.2	JUSTIFICATIVAS	31
1.3	SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA	32
1.3.1	<i>Breve histórico da Medição Fasorial Sincronizada</i>	33
1.4	PROJETO MEDFASEE	34
1.4.1	<i>Projeto MedFasee BT</i>	34
1.4.2	<i>Projeto MedFasee Eletrosul</i>	37
1.4.3	<i>Projeto MedFasee CTEEP</i>	38
1.5	APLICAÇÕES DE SPMS	39
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	46
<b>2</b>	<b>DFAM - AMBIENTE MATLAB DE ANÁLISE DE DADOS FASORIAIS</b>	<b>47</b>
2.1	OBJETIVOS	47
2.2	CARACTERÍSTICAS	48
2.3	FUNCIONALIDADES	50
2.3.1	<i>Módulo 1 – Análise em Regime Permanente</i>	51
2.3.2	<i>Módulo 2 – Análise de Ocorrências</i>	57
2.3.3	<i>Módulo 3 – Análise de Qualidade de Energia Elétrica</i>	59
2.3.4	<i>Módulo 4 – Detecção e Identificação de Eventos</i>	61
2.3.5	<i>Módulo 5 – Análise de Oscilações Eletromecânicas</i>	61
2.4	INTERFACE GRÁFICA	62
2.4.1	<i>Janela de abertura</i>	62
2.4.2	<i>Janela de funcionalidades</i>	63
2.5	FUNÇÕES COMPLEMENTARES	66
2.5.1	<i>Filtragem de sinais</i>	67
2.6	COMENTÁRIOS FINAIS	68
<b>3</b>	<b>OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA</b>	<b>69</b>
3.1	ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	69
3.2	CONCEITOS DE OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS	71
3.3	IDENTIFICAÇÃO DE OSCILAÇÕES A PARTIR DO MODELO LINEAR DO SISTEMA ELÉTRICO	72
3.3.1	<i>Características das oscilações</i>	74
3.4	OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	77

3.5	MÉTODOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE OSCILAÇÕES ELÉTROME CÂNICAS .....	80
3.6	MÉTODOS BASEADOS NA DECOMPOSIÇÃO ESPECTRAL E NA CORRELAÇÃO .....	83
3.6.1	<i>Transformada Discreta de Fourier</i> .....	83
3.6.2	<i>Método Wiener-Hopf</i> .....	84
3.7	MÉTODOS BASEADOS NA RECONSTRUÇÃO DO SINAL ..	86
3.7.1	<i>Método de Prony</i> .....	87
3.7.2	<i>Método HTLS – Hankel Total Least Square</i> .....	91
3.7.3	<i>Método Feixe de Matrizes (Matrix Pencil)</i> .....	94
3.8	MÉTODOS BASEADOS NA ESTIMAÇÃO DO MODELO LINEAR DO SISTEMA .....	97
3.8.1	<i>Métodos de subespaço de estados</i> .....	97
3.8.2	<i>Método N4SID</i> .....	101
3.8.3	<i>Método da Realização Balanceada Estocástica</i> .....	104
3.9	COMENTÁRIOS FINAIS .....	107
<b>4</b>	<b>TÉCNICAS PARA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE DE OSCILAÇÕES ELETROME CÂNICAS .....</b>	<b>109</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	109
4.2	REAMOSTRAGEM DE SINAIS.....	110
4.3	JANELAS DE ANÁLISE .....	113
4.3.1	<i>Processamento por janelas deslizantes</i> .....	114
4.4	APLICABILIDADE DOS MÉTODOS: RINGDOWN E DADOS AMBIENTE .....	116
4.5	TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER.....	116
4.5.1	<i>Vazamento espectral</i> .....	117
4.6	MÉTODO DE PRONY .....	121
4.7	MÉTODO HTLS – HANKEL TOTAL LEAST SQUARE .....	122
4.8	MÉTODO FEIXE DE MATRIZES .....	124
4.9	MÉTODO N4SID.....	125
4.10	MÉTODO REALIZAÇÃO BALANCEADA ESTOCÁSTICA 126	
4.11	MÉTODO WIENER-HOPF .....	127
4.12	SINTESE DOS AJUSTES DE PARÂMETROS .....	127
4.13	VALIDAÇÃO DOS AJUSTES POR SIMULAÇÃO .....	129
4.13.1	<i>Erro ao aplicar métodos para ringdown em dados ambiente</i> 132	
4.14	COMENTÁRIOS FINAIS.....	132
<b>5</b>	<b>VALIDAÇÃO DOS DESENVOLVIMENTOS EM DADOS REAIS DO SPMS MEDFASEE BT .....</b>	<b>135</b>

5.1	UTILIZAÇÃO DO DFAM EM ESTUDOS DE OCORRÊNCIA NO SIN.....	135
5.1.1	<i>Caso 1 – 10/02/2010: Separação do SIN em 3 Subsistemas</i> 135	
5.1.2	<i>Caso 2 - 02/09/2011: Desligamento de LTs da UHE de Itaipu</i> 138	
5.2	VALIDAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE IDENTIFICAÇÃO DE OSCILAÇÕES ELETROMECCÂNCIAS.....	143
5.2.1	<i>Validação dos Métodos para Ringdown.....</i>	144
5.2.2	<i>Conclusões para os métodos de identificação de oscilações eletromecânicas a partir de ringdown.....</i>	162
5.2.3	<i>Validação das metodologias para processamento de dados ambientes.....</i>	163
5.2.4	<i>Conclusões para os métodos de identificação de oscilações eletromecânicas a partir de dados ambiente.....</i>	169
5.2.5	<i>Aplicação da DFT em dados ambientes.....</i>	169
5.3	COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE O CAPÍTULO .....	176
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>179</b>
6.1	AMBIENTE DFAM.....	179
6.2	METODOLOGIAS DE IDENTIFICAÇÃO DE OSCILAÇÕES ELETROMECCÂNCIAS .....	180
6.3	PUBLICAÇÕES RELACIONADAS .....	182
6.4	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	183
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>185</b>
	<b>ANEXO A – DECOMPOSIÇÃO LQ.....</b>	<b>199</b>
	<b>APÊNDICE A – VARIÁVEIS DO DFAM.....</b>	<b>201</b>
	<b>APÊNDICE B – ARQUIVOS DE ENTRADA.....</b>	<b>205</b>
	<b>APÊNDICE C – APLICAÇÃO NUMÉRICA DOS MÉTODOS PARA RINGDOWN .....</b>	<b>207</b>
	<b>MÉTODO DE PRONY.....</b>	<b>208</b>
	<b>MÉTODO HTLS.....</b>	<b>210</b>
	<b>MÉTODO FEIXE DE MATRIZES.....</b>	<b>212</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro está perto de completar 135 anos. Os primeiros registros que se têm são do ano de 1879, com a inauguração, na estação central da Estrada de Ferro Dom Pedro II, atual Estrada de Ferro Central do Brasil, da primeira instalação de iluminação elétrica permanente do país, energia proveniente de geração termoeleétrica. No ano de 1881, pela Diretoria Geral dos Telégrafos, foi inaugurada a primeira iluminação externa pública do país, na atual Praça da República no Rio de Janeiro. A primeira usina hidrelétrica brasileira entrou em operação no ano de 1883, localizada no Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, na cidade de Diamantina. No ano de 1930, a capacidade instalada de energia no Brasil era de 780MW e em 1940 de 1.250MW. Em 1954, entraram em operação as primeiras usinas de grande porte do país: a usina termoeleétrica de Piratininga e a usina Hidrelétrica de Paulo Afonso I, pertencente à Chesf. No ano de 1957 foi criada a Centrais Elétricas de Furnas com o objetivo de explorar o potencial hídrico do rio Grande em Minas Gerais, para solucionar a crise energética que ocorria no sudeste. Em 1961, no governo de João Goulart, foi criada a Eletrobrás com o objetivo de coordenar o setor de energia elétrica brasileiro. Em 1984 foi inaugurada a usina Hidrelétrica de Itaipu, com 12.600MW. No ano de 1995 foi sancionada a Lei nº 8.987 (BRASIL, 1995), que dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos, o que inclui os serviços de suprimento de energia elétrica. Com isso, em 1996, tem-se um marco regulatório do setor elétrico com a criação da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). No ano de 1998 ocorreu a desverticalização do sistema, quando foram desmembradas as atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização, com a regulamentação do MAE (Mercado Atacadista de Energia Elétrica) e com a criação do ONS (Operador Nacional do Sistema), substituindo o GCOI (Grupo Coordenador para Operação Interligada) (Instituto EDP, 2011).

Atualmente, o Sistema Interligado Nacional (SIN), cujo mapa geoeletrico é ilustrado na Figura 1.1, é composto por aproximadamente 103,4 mil km de linhas de transmissão (LT). A carga média do SIN está próxima a 56.000 MW, a máxima potência demandada foi de 71.133 MW em 13/12/2011 e a capacidade instalada está em aproximadamente 105.000 MW, geradas principalmente por fontes hidráulicas. A Figura

1.2 apresenta o percentual de cada tipo de fonte no sistema de geração brasileiro. (ONS, 2011).

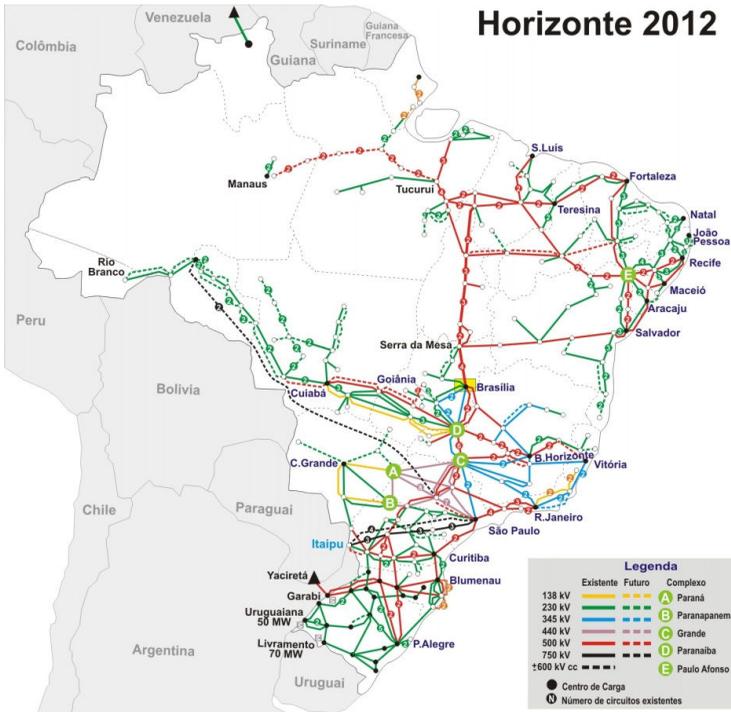


Figura 1.1 – Mapa do SIN. (ONS, 2012).

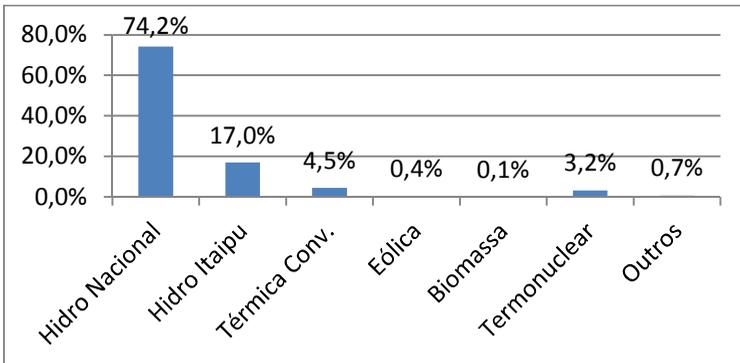


Figura 1.2 – Percentual de capacidade instalada por tipo de fonte. (ONS, 2011).

Sistemas elétricos de grandes dimensões, como o caso do sistema elétrico brasileiro, possuem grandes dificuldades operacionais que exigem sistemas resilientes de monitoramento, proteção e controle. Entre os desafios operacionais que surgem nos sistemas elétricos, mencionam-se as oscilações pouco amortecidas que dependem das características das máquinas síncronas, dos sistemas de controle associados, e também do nível de carregamento das grandes interligações dos sistemas de potência. Os principais equipamentos utilizados para adicionar amortecimento as oscilações eletromecânicas são os Estabilizadores de Sistemas de Potência (*Power System Stabilizer – PSS*) que atuam na excitação da máquina síncrona e os dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) (FOUAD *et al.*, 1997) (NAJAFI *et al.*, 2006).

Com os desenvolvimentos tecnológicos recentes tem se tornado possível a incorporação de equipamentos ainda mais robustos, capazes de fornecer aos sistemas de controle informações ainda mais precisas sobre o comportamento em regime normal ou dinâmico do sistema elétrico. Segundo Horowitz *et al.* (2010) a evolução dos métodos de controle e proteção, dos equipamentos de sensoriamento, dos sistemas de medição e monitoramento, dos dispositivos eletrônicos e das técnicas de suporte a decisão, são os principais fatores que contribuem para o processo de modernização do sistema elétrico. O avanço nos sistemas de comunicação permite a transferência de dados em banda larga e alta velocidade e interconecta todos estes novos desenvolvimentos (Figura 1.3).

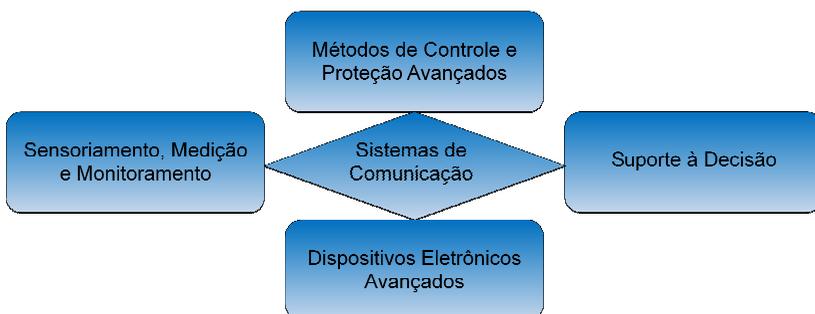


Figura 1.3 – Áreas tecnológicas principais.

Diante desse modelo de sistemas elétricos, destaca-se a tecnologia de medição fasorial sincronizada que permite a utilização de

diversas metodologias até então impraticáveis, devido à restrição de informações, como o comportamento dinâmico dos sistemas elétricos.

A medição fasorial sincronizada tem sido objeto de amplo estudo em todo o mundo. Diversos estudos de aplicação estão sendo feitos, muitos deles já são aplicados aos sistemas reais, mas muitos outros ainda precisam ser explorados devido à grande abrangência e aplicabilidade dessa tecnologia.

O presente trabalho explora os sistemas de medição fasorial sincronizada de forma a contribuir para o desenvolvimento desta tecnologia e proporcionar mais segurança à operação dos sistemas elétricos de potência.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é implementar um ambiente computacional em Matlab® destinado ao desenvolvimento e implementação de metodologias para o estudo do desempenho de sistemas elétricos a partir de dados de sincrofases. Esse ambiente contempla as seguintes características.

- **Expansibilidade:** facilita a implementação e incorporação de novas metodologias, de forma a servir de base para o desenvolvimento de diversos trabalhos que envolvam sincrofases.
- **Compatibilidade:** permite que diferentes desenvolvimentos possam ser utilizados em um mesmo ambiente de estudos, servindo como base a diferentes implementações.
- **Confiabilidade:** possui o menor índice de falhas possível de forma a evitar ações do usuário diretamente nos arquivos fonte.
- **Interface Gráfica:** facilita o uso e possui recursos autoexplicativos, seguindo padrões de programas profissionais consolidados.

O ambiente permite a implementação de metodologias classificadas em cinco módulos de análise, sendo eles:

- análise em regime permanente;
- análise de ocorrências;
- análise de oscilações eletromecânicas;
- detecção e identificação de eventos e
- análise de qualidade de energia elétrica.

Além da disponibilização do ambiente de desenvolvimento, este trabalho objetiva explorar metodologias para a identificação de oscilações eletromecânicas de baixa frequência, sendo eles os métodos de Prony, *Hankel Total Least Squares* – HTLS, Feixe de Matrizes (*Matrix Pencil*), Realização Balanceada Estocástica, N4SID, Wiener-Hopf e a *Discrete Fourier Transform* – DFT.

Mesmo utilizando o Matlab®, que já possui funções prontas com alguns dos métodos abordados, neste trabalho essas funções não foram utilizadas, pois os métodos foram implementados por completo. Foram aproveitados apenas os recursos matemáticos básicos do Matlab®, por exemplo, operações de matrizes e solução de sistemas lineares.

Na literatura é possível encontrar grande diversidade de métodos para identificar oscilações eletromecânicas. Para se aplicar estas metodologias em dados de sincrofasores, é preciso ajustar alguns dos parâmetros como ordem do modelo, tamanho da janela de dados e taxa de amostragem, dificultando os estudos dessa natureza. O ajuste desses parâmetros e a escolha do método adequado a ser utilizado em cada caso são fundamentais para uma boa estimativa dos resultados. Logo, objetiva-se mitigar esta dificuldade, propondo o ajuste desses parâmetros para aplicações em sincrofasores.

Por fim, avaliam-se esses desenvolvimentos utilizando dados reais do sistema elétrico brasileiro, obtidos a partir do sistema de medição fasorial sincronizada do projeto MedFasee (DECKER *et al.*, 2011), instalado na rede de baixa tensão do SIN.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

Desde a implantação do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada do Projeto MedFasee Labplan/UFSC diversos trabalhos foram realizados por pesquisadores de Iniciação Científica, Mestrado e Doutorado. Devido à ausência de um ambiente base, esses trabalhos seguiram padrões próprios, o que evidenciou a necessidade de um ambiente padronizado que facilitasse a implementação de novas metodologias.

Uma das principais vantagens proporcionadas pela medição fasorial sincronizada é a possibilidade de monitorar, através de grandezas elétricas, as oscilações eletromecânicas dos sistemas elétricos. Devido a grande importância, esse tema tem sido amplamente abordado em estudos da área, exigindo metodologias adequadas e bem calibradas

para que seja possível a aplicação destes métodos nos estudos deste problema.

Na literatura são encontrados diversos métodos de identificação de oscilações eletromecânicas, porém a aplicação desses apresenta dificuldades para o processamento de dados reais provenientes de um sistema de medição fasorial. Entre elas, menciona-se o ajuste dos parâmetros exigidos pelos métodos, como ordem do modelo, tamanho da janela e taxa de amostragem. Portanto, fez-se necessário um estudo para ajustar adequadamente esses parâmetros, de forma a auxiliar a detecção inicial dos modos de oscilação, utilizando sincrofasores.

### 1.3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

Um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS - *Synchronized Phasor Measurement System*) com seus principais componentes é ilustrado na Figura 1.4. Esses componentes são os sistemas de sincronização, as PMUs (*Phasor Measurement Unit*), o PDC (*Phasor Data Concentrator*) e os canais de comunicação.

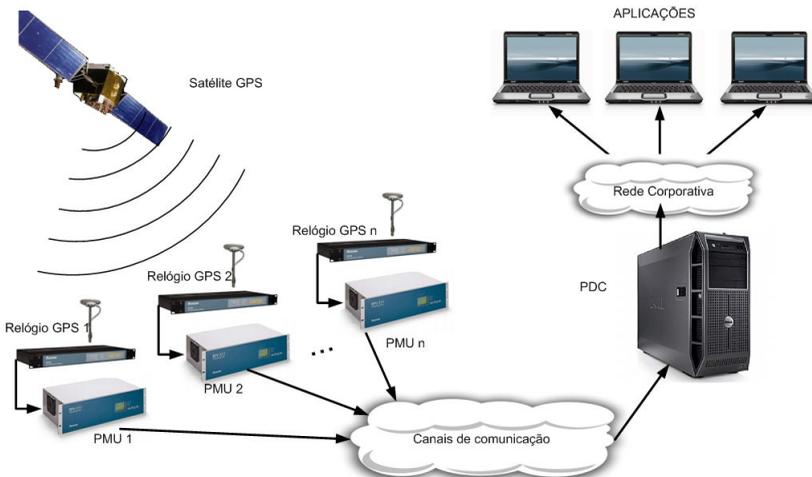


Figura 1.4 – Sistema de medição Fasorial Sincronizada – SPMS.

As PMUs são responsáveis por converter os sinais analógicos de tensão e corrente em sinais<sup>1</sup> discretos na forma de fasores (módulo e

<sup>1</sup>Define-se como sinal de SPMS, as medidas fasoriais em função do tempo.

ângulo). As PMUs podem fornecer fasores a uma taxa de 10 a 60 fasores por segundo (fasores/s) em conformidade com a norma IEEE C37.118.1 (IEEE, 2011 Seção 5.4.1). Cada fasor calculado recebe localmente uma etiqueta de tempo fornecida pelo sistema de sincronização, geralmente o GPS (*Global Positioning System*). Os dados são enviados, através dos canais de comunicação, para o Concentrador de Dados Fasoriais (PDC – *Phasor Data Concentrator*), que organiza, armazena e os disponibiliza para as aplicações, sejam em tempo real ou para estudos *off-line*. (Decker *et al.* 2006).

### 1.3.1 Breve histórico da Medição Fasorial Sincronizada

O processo evolutivo de desenvolvimento e aplicação da tecnologia de medição fasorial sincronizada iniciou em meados dos anos 70, com as primeiras medições de defasagem angular utilizando sistemas de sincronização. Desde então, foram possíveis grandes evoluções até se chegar aos atuais sistemas de medição fasorial sincronizada.

Na sequência, são listados cronologicamente alguns dos principais registros históricos envolvendo a medição fasorial sincronizada no mundo, destacando-se os fatos ocorridos no Brasil.

<b>1975-1980</b>	Primeiras medições de defasagem angular para uso em proteção, sincronizadas pelos sistemas LORAN-C, GOES e HBG (na Europa). (Phadke, 2008).
<b>1980</b>	Governo dos EUA autorizou o uso seletivo do sistema GPS. (GPS, 2012).
<b>1980-1985</b>	Virginia Tech desenvolveu as primeiras PMUs em laboratório, usando sincronização temporal via GPS. (PHADKE, 2008).
<b>1989</b>	Início do projeto WAMS ( <i>Wide Area Measurement System</i> ) uma parceria entre as empresas BPA, WAPA e SCE. (CAI <i>et al.</i> , 2005).
<b>1991</b>	- Primeiras PMUs comercializadas pela Macrodyne; (Phadke, 2008) - Publicação da norma IEEE Std. C37.111 que define o formato COMTRADE de armazenamento e intercâmbio de arquivos dados. (IEEE, 1991).
<b>1993</b>	Instalação das primeiras PMUs nos sistemas da BPA e SCE no âmbito do projeto WAMS. (CAI <i>et al.</i> , 2005).
<b>1994</b>	Início das pesquisas em SPMS na China. (XIE <i>et al.</i> , 2006).
<b>1995</b>	Publicação da norma IEEE std. 1344, primeira norma exclusiva de sincrofasores. (IEEE, 1995).
<b>1996</b>	Primeiro PDC desenvolvido pela BPA (Labview®); (EPG, 2012).

<b>2003</b>	Blecaute nos EUA e Canadá (ANDERSSON <i>et al.</i> , 2005) e consequente decisão de se criar o EIPP (Eastern Interconnect Phasor Project) (DONNELLY <i>et al.</i> , 2006).
<b>2003</b>	Início do Projeto MedFasee [LabPlan/UFSC, Reason] (Ehrensperger <i>et al.</i> , 2004) (DECKER <i>et al.</i> , 2006).
<b>2005</b>	Aprovação da norma IEEE std. C37.118 que estabelece os requisitos de desempenho em regime permanente de PMUs e os padrões para a transferência de dados. (IEEE, 2005).
<b>2005</b>	Contratação de consultoria pelo ONS para especificação da arquitetura de um SPMS para o SIN.
<b>2007</b>	Criação do NASPI ( <i>North American SynchroPhasor Initiative</i> ), uma união das iniciativas do WECC e EIPP. (NASPI, 2012).
<b>2007</b>	Início do projeto de P&D MedFasee Eletrosul [LabPlan/UFSC, Eletrosul, Reason] (DECKER <i>et al.</i> , 2009).
<b>2008</b>	Implantação do Sistema Nacional de Medição Fasorial em Baixa Tensão – SPMS MedFasee BT Nacional [LabPlan/UFSC, Finep, CNPq, Reason] (DECKER <i>et al.</i> , 2011).
<b>2009</b>	Realização de testes de certificação de PMU no NIST/EUA patrocinados pelo ONS. (MORAES <i>et al.</i> , 2010).
<b>2009</b>	Início do Projeto de P&D MedFasee CTEEP [LabPlan/UFSC, CTEEP, Reason] (DECKER <i>et al.</i> , 2011).
<b>2011</b>	Revisão da norma IEEE std. C37.118/2005 e desmembramento em (IEEE, 2011): - C37.118.1 – Estabelece os requisitos de desempenho dinâmico e classifica as PMUs em tipo P e M (P – <i>Protection</i> e M – <i>Monitoring</i> ) - C37.118.2 – Estabelece protocolos para comunicação e transferência de dados entre PMUs, PDCs e outras aplicações.

## 1.4 PROJETO MEDFASEE

O projeto MedFasee é uma iniciativa do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LabPlan da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, com o objetivo de realizar estudos utilizando dados de medição fasorial sincronizada. Para isso, foram instalados protótipos de SPMS, tanto na rede de baixa tensão quanto em linhas de transmissão, como descrito na sequência.

### 1.4.1 Projeto MedFasee BT

O projeto MedFasee BT teve início no ano de 2003 como resultado de uma parceria estabelecida entre a UFSC, a Reason Tecnologia e a FINEP. O projeto tem como objetivos principais a pesquisa, o desenvolvimento e a divulgação da tecnologia de medição fasorial sincronizada e suas aplicações. Os trabalhos realizados envolvem pesquisas e desenvolvimentos nas unidades de medição fasorial sincronizada propriamente ditas (PMUs), nos sistema de transmissão e concentração de dados (PDC) e nas aplicações.

Os primeiros desenvolvimentos desse projeto foram realizados utilizando recursos computacionais para simular um SPMS e verificar as potencialidades desse sistema (EHRENSPERGER *et al.* 2004). O primeiro protótipo de SPMS do Projeto Medfasee BT, instalado em campo, entrou em operação no ano de 2004 e era constituído por três PMUs localizadas nas cidades de Curitiba-PR, Florianópolis-SC (PMU + PDC) e Porto Alegre-RS. Essas PMUs estavam instaladas na rede de baixa-tensão (127/220V), monitorando fasores de tensão.

Com apenas essas três unidades de medição, foi possível realizar diversos estudos acerca do sistema elétrico brasileiro. Nessa oportunidade, decidiu-se pela transmissão ao PDC dos fasores das três fases e pela utilização da taxa de 60 fasores/s, o que corresponde a um fasor por ciclo elétrico em sistemas de 60 Hz, como é o caso do Brasil. (DECKER *et al.*, 2006).

A partir dos resultados positivos obtidos com o SPMS instalado na região sul, ampliou-se, no ano de 2008, a estrutura do SPMS. Foram incorporados seis novos pontos de medição, totalizando nove, que cobriram as cinco regiões geográficas do país e constituíram um Sistema Nacional de Medição Fasorial Sincronizada.

Atualmente, o protótipo da baixa tensão possui 14 unidades de medição que estão localizadas próximas aos grandes centros de cargas, geração e corredores de transmissão importantes (DECKER, 2011).

A Figura 1.5 ilustra um resumo da evolução do SPMS MedFasee BT em relação aos pontos monitorados.

Os pontos de medição estão alocados em universidades parceiras, listadas na sequência. O nome da universidade é comumente utilizado para representar o local da medição.

- **UFPA** – Univ. Federal do Pará (Belém – PA);
- **UFC** – Univ. Fed. do Ceará (Fortaleza – CE);
- **UFPE** – Univ. Fed. de Pernambuco (Recife – PE).
- **UNIR** – Univ. Fed. de Rondônia (Porto Velho – RO);

- **UnB** – Univ. de Brasília (Brasília – DF);
- **UFMT** – Univ. Fed. do Mato Grosso (Cuiabá – MT);
- **UFMG** – Univ. Fed. de Minas Gerais (Belo Horizonte – MG);
- **UFMS** – Univ. Fed. do Mato Grosso do Sul (Campo Grande – MS);
- **UNIFEI** – Univ. Fed. de Itajubá (Itajubá – MG);
- **COPPE/UFRJ** – Univ. Fed. do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro – RJ);
- **USP-SC** – Univ. de São Paulo núcleo São Carlos (São Carlos – SP);
- **UTFPR** – Univ. Tecnológica Federal do Paraná (Curitiba – PR);
- **UFSC** – Univ. Fed. de Santa Catarina (Florianópolis – SC);
- **UNIPAMPA** – Univ. Fed. dos Pampas (Alegrete – RS);



Figura 1.5 – Evolução do SPMS MedFasee BT.

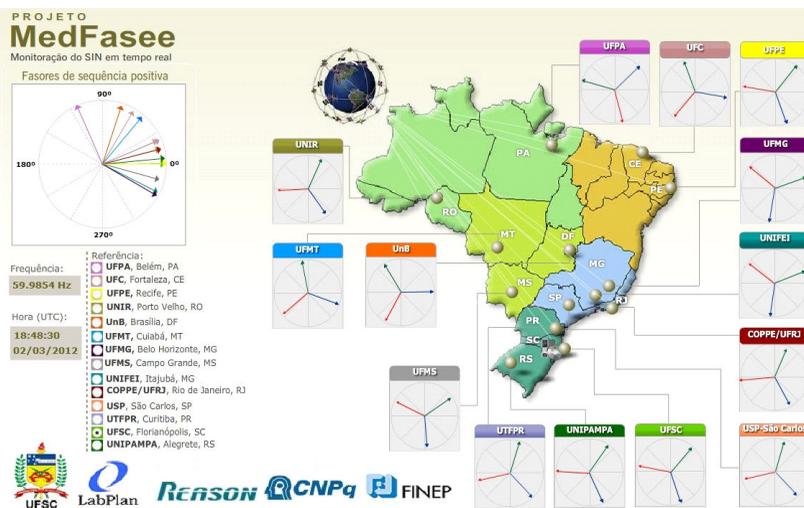


Figura 1.6 – SPMS MedFasee BT [www.medfasee.ufsc.br/temporeal]

A Figura 1.6 apresenta um retrato do site oficial do projeto MedFasee, que mostra a distribuição geográfica das instalações de pontos de medição.

#### 1.4.2 Projeto MedFasee Eletrosul

O Projeto MedFasee Eletrosul foi iniciado no ano de 2007, em um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D ciclo 2004/2005, Código ANEEL: 0402-13/2005) em parceria da Eletrosul com o LabPlan/UFSC e a Reason Tecnologia (DECKER *et al.*, 2009). O objetivo principal desse projeto foi de implementar um protótipo de SPMS no sistema de transmissão de 525kV da empresa, o que permitiu explorar outras grandezas elétricas como a corrente e o fluxo de potência. Além disso, foram investigadas características próprias dos sistemas de alta tensão, como a influência dos canais de instrumentação nas medidas fasoriais (LIRA, 2010), metodologias para cálculos de parâmetros de linhas de transmissão (LIRA, 2010) e métodos para localização de faltas (BENETTI, 2009).

O SPMS MedFasee Eletrosul constituía-se por quatro PMUs instaladas nas subestações de 525kV de Ivaiporã (PR), Areia (PR), Campos Novos (SC) e Nova Santa Rita (RS), e pelo PDC localizado na sede da empresa em Florianópolis (SC), monitorando as seguintes linhas de transmissão, ilustradas na Figura 1.7.



Figura 1.7 – SPMS MedFasee Eletrosul.

- LT 525 kV Ivaiporã – Salto Santiago;
- LT 525 kV Ivaiporã – Areia, ambos os terminais
- LT 525 kV Areia – Campos Novos, ambos os terminais;
- LT 525 kV Ivaiporã – Londrina;
- LT 525 kV Campos Novos – Caxias e;
- LT 525 kV Nova Santa Rita – Gravataí

O SPMS MedFasee Eletrosul, pioneiro no Brasil em redes de alta tensão, contribuiu significativamente para o desenvolvimento e instalação de equipamentos de medição fasorial sincronizada em redes de alta tensão, a adequação das redes corporativas de comunicação e a implantação de metodologias para o processamento destes dados.

### 1.4.3 Projeto MedFasee CTEEP

O Projeto MedFasee CTEEP foi iniciado em 2009, em um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D ciclo 2006/2007, Código ANEEL: 0068-001/2007) da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – CTEEP, em parceria com o LabPlan/UFSC e a Reason Tecnologia. O objetivo desse projeto foi implementar um protótipo de SPMS no sistema de transmissão de 440 kV da CTEEP. Entre os principais desenvolvimentos do projeto destacam-se a instalação de 5 PMUs e o desenvolvimento de um sistema de aquisição e processamento de dados (PDCS) (FÜRSTENBERGER, 2010).

Para esse projeto foi desenvolvido o programa *Monitor de Dados Fasoriais – MDF* que permite o monitoramento das grandezas fasoriais e da dinâmica do sistema elétrico em tempo real. O programa disponibiliza funcionalidade de acesso ao banco de dados histórico para a realização de análises *off-line* (regime permanente e ocorrências) e metodologias de localização de falta.

Foi avaliado o desempenho dos transformadores de corrente destinados à proteção e aqueles destinados à medição, para verificar a influência destes equipamentos nas medidas fasoriais (DECKER *et al.*, 2011).

As PMUs estão instaladas na rede de alta tensão (440kV) da CTEEP, monitorando seis terminais de linha (tensão e corrente), nas subestações de Ilha Solteira, Bauru e Cabreúva. As linhas de transmissão monitoradas são:

- LT 440kV Ilha Solteira – Bauru C1 e C2;
- LT 440kV Bauru – Ilha Solteira C2;
- LT 440kV Bauru – Cabreúva C1;
- LT 440kV Cabreúva – Bauru C1;
- LT 440kV Cabreúva – Bom Jardim.

A Figura 1.8 ilustra geograficamente as LTs monitoradas. Observa-se que as LTs integralmente destacadas em preto indicam que a medição é feita nos dois extremos. As LTs parcialmente destacadas indicam que somente uma extremidade destas LTs está sendo monitorada.

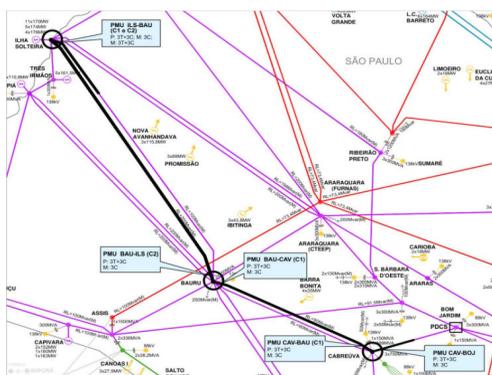


Figura 1.8 – SPMS MedFasee CTEEP. (Decker *et al.*, 2011).

## 1.5 APLICAÇÕES DE SPMS

As aplicações envolvendo medição fasorial sincronizada são classificadas em Aplicações Básicas, Aplicações de Monitoramento, Aplicações de Controle e Proteção e Aplicações Especiais, esquematizado na Figura 1.9 (Xie *et al.*, 2006) (Santos, 2008).

A partir dessa classificação, listam-se as seguintes aplicações:

- **Aplicações Básicas:** servem de apoio às demais aplicações.
- *Aquisição e tratamento de dados fasoriais (PDC)* - O PDC é o equipamento responsável pelo recebimento, tratamento, armazenamento e disponibilização dos dados fasoriais. Por isso, é importante que se tenha um equipamento confiável, sendo este

objeto de estudos envolvendo a medição fasorial sincronizada. O primeiro PDC foi desenvolvido pela BPA (*Boneville Power Administrator*) em 1996, e foi construído utilizando a plataforma LabView (EPG, 2012). Entre os principais desenvolvimentos relacionados aos PDCs, destaca-se o desenvolvimento da GPA (*Grid Protection Alliance*) que disponibilizou em código aberto o OpenPDC (GPA, 2012). O OpenPDC é um concentrador de dados fasoriais destinados ao armazenamento e disponibilização de dados para aplicação em tempo real. Este sistema tem sido amplamente utilizado no mundo, inclusive no SPMS MedFasee BT. Em 2004, no âmbito do projeto MedFasee, foi desenvolvido um PDC para atender as necessidades deste SPMS. Este PDC foi desenvolvido utilizando pacotes MySQL e Linguagem C/C++, o sistema operacional escolhido foi o GNU/Linux, com gerenciamento de tempo real feito com pacote computacional RTAI, descrito em Decker *et al.* (2006). Também no âmbito do Projeto MedFasee tem-se o trabalho de Fürstenberger (2010) que desenvolveu um sistema hierárquico de PDC denominado PDCS (Sistema de Concentradores de Dados Fasoriais) que além de redundância de armazenamento, proporciona o alívio computacional para o recebimento, organização e armazenamento dos dados, uma vez que isto é feito de maneira distribuída, além de facilitar a expansibilidade dos SPMS.

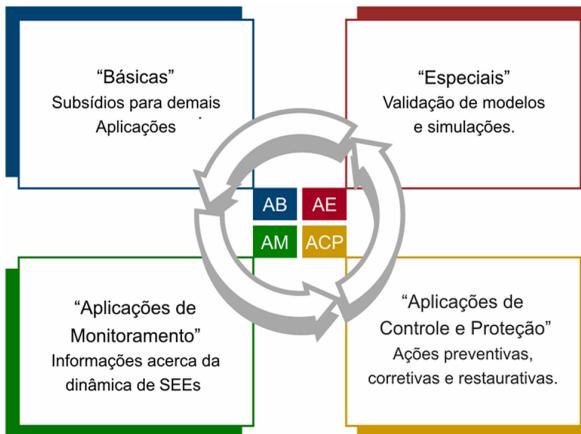


Figura 1.9 – Aplicações da medição fasorial sincronizada.

- *Visualização da dinâmica em tempo real* - A alta taxa de aquisição de dados dos SPMS permite que seja monitorada em tempo real a dinâmica dos sistemas elétricos de potência. Para isso, são necessárias ferramentas computacionais de alto desempenho, que permitam o processamento dos dados em tempo real. Nesta área de pesquisa, Venkatasubramanian *et al.* (2011) desenvolveram um programa computacional denominado OMS (*Oscillation Monitoring System*) que permite a visualização de oscilações eletromecânicas em tempo real. Existem também diversas soluções comerciais como os programas RTDMS® (EPG, 2012), PISystem® (OSISOFT, 2011), PsyMetrix® (2011), PSGuard® (ABB, 2011), WAProtector® (Elpros, 2011), entre outros. No âmbito do projeto MedFasee foi elaborado o aplicativo MDF (Decker *et al.*, 2011) que permite a visualização de oscilações eletromecânicas em tempo real através da Transformada Discreta de Fourier.
- *Registro sincronizado de dados de perturbações* - Os SPMS, em geral, são constituídos por diversas PMUs espalhadas ao longo de todo o sistema elétrico. Isso possibilita registrar a propagação e as consequências de uma perturbação em todo o sistema.
- **Aplicações de Monitoramento:** fornecem informações a respeito das condições operativas do sistema, de forma a avaliar principalmente a segurança.
  - *Análise de oscilações eletromecânicas* - As oscilações eletromecânicas estão presentes nos sistemas elétricos, e são respostas transitórias de um sistema dinâmico. Por serem normalmente de baixa intensidade e de curta duração, estas oscilações não podem ser monitoradas através de sistemas de análise em regime permanente. As oscilações eletromecânicas tem sido amplamente estudadas utilizando SPMS, como mostram os resultados dos trabalhos de Trudnowski *et al.* (1999), Liu *et al.* (2007), Messina (2009), Turunen (2011), Vanfretti *et al.* (2011) e outros. Com a medição fasorial sincronizada é possível o monitoramento destas oscilações em tempo real. Martinez *et al.* (2011) e Venkatasubramanian *et al.* (2011) descrevem ferramentas computacionais que monitoram em tempo real modos de oscilação. No âmbito do projeto MedFasee estudos

nesta área foram desenvolvidos por Santos (2008) e Prioste *et al.* (2011).

- *Estimação de estados híbrida e distribuída* - O estimador de estados é amplamente utilizado para fornecer informações detalhadas do ponto de operação em regime permanente do sistema elétrico. Esses estimadores fazem parte dos sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) que realizam medidas de tensão, corrente e potência nas barras e linhas de transmissão do sistema elétrico. Com a medição fasorial sincronizada, adicionam-se aos estimadores medidas bastante precisas, aumentando também a redundância do plano de medição. Uma das principais vantagens proporcionadas pela medição fasorial sincronizada nos estimadores de estado é a possibilidade de medir o ângulo das tensões e correntes, que antes eram apenas estimados. Os primeiros estudos propunham extinguir os estimadores de estados tradicionais, tendo como objetivo eliminar a estimação de medidas passando a medir todo o sistema (ZHOU *et al.*, 2006). Porém, percebeu-se que não se trata de uma metodologia economicamente viável pois, além de descartar os vários equipamentos existentes no sistema, seria necessário colocar uma PMU por barra. Partiu-se então para a incorporação das medidas fasoriais no estimador convencional, objetivando a melhoria da observabilidade e precisão das medidas (PHADKE *et al.*, 2006). Na Espanha já se têm registros de sistemas de estimação de estados híbridos, obtidos através da adequação do sistema SCADA (MARTINEZ *et al.*, 2004). No Brasil, os trabalhos de Simões Costa *et al.* (2011, 2012) utilizam a medição fasorial sincronizada de forma a aplicar o conceito de estimadores de estados híbridos.
- *Monitoramento de estabilidade de tensão e frequência* - As medidas fornecidas pelos SPMS permitem que se analisem as estabilidades de tensão e frequência, o que significa a verificação dos níveis de conformidade dessas grandezas. Para uma aplicação robusta, esses monitoramentos devem ser associados a esquemas de proteção e controle. Embora existam poucos registros de estudos nesta área, o trabalho de Gong *et al.* (2006) utiliza dados em tempo real fornecido pelos SPMS para estimar índices de estabilidade que proporcionam identificar os

valores de máxima transferência de potência entre subsistemas. O trabalho de Le Fu *et al.* (2008) explora o problema da estabilidade de tensão e o trabalho de Larsson e Rehtanz (2002) explora o problema da estabilidade de frequência.

- *Monitoramento do estado de operação de geradores* - O monitoramento do ponto de operação de uma máquina síncrona é fundamental para uma operação segura e principalmente para preservar o equipamento. Com PMUs instaladas na saída de um gerador é possível medir os valores de potência ativa (P) e reativa (Q), verificando na curva de capacidade (NILSSON *et al.*, 1994) da máquina síncrona se o ponto de operação condiz com as condições asseguradas pelos fabricantes. (XIE *et al.*, 2006). Alguns trabalhos fazem uso da tecnologia de SPMS no desenvolvimento de estimadores dinâmicos para as variáveis de estado de geradores (TIANSHU BI *et al.*, 2009).
- **Aplicações de Controle e Proteção:** baseiam-se nas condições operativas do sistema, para realizar ações preventivas, corretivas e restaurativas.
  - *Controle de emergência* - Os esquemas de controle são de fundamental importância para a segurança operacional do sistema, por isso é fundamental o uso de sistemas de controle robustos para atuar em tempos curtos. A medição fasorial contribui para esses sistemas, visto que a alta taxa de aquisição de dados permite o monitoramento da dinâmica do sistema em tempo real. Entre os diversos estudos utilizando PMU em sistemas de controle, cita-se o trabalho de Li *et al.* (2008) que realiza técnicas de controle preditivo e corretivo, de forma a assegurar a estabilidade e segurança do sistema elétrico, utilizando dados de medição fasorial sincronizada. Shi *et al.* (2005) e Yingtao *et al.* (2005) descrevem esquemas especiais de segurança como *Out-of-Step*, cuja finalidade é atuar em aberturas de linhas e cortes de carga e em relés de subfrequência, utilizando técnicas seletivas para minimizar o corte de carga. Existem também trabalhos, como os de Kosterev *et al.* (1998), Faucon *et al.* (1997) e Yi *et al.* (2001), aplicando controle de emergência para perda de sincronismo e na análise de estabilidade transitória. (SANTOS, 2008).

- *Geração distribuída* - O esgotamento dos recursos energéticos e as dificuldades econômicas e ambientais impostas à construção de grandes centros geradores estão fazendo com que países invistam em geração distribuída. Porém, começam a surgir grandes desafios para se operar esse moderno sistema, já que a carga passará a ser uma componente ativa na rede. Entre outras aplicações, com medição fasorial será possível fazer esquemas especiais de proteção para o ilhamento e recomposição de pequenas áreas de forma a garantir a continuidade do fornecimento (BORGUETTI *et al.*, 2011).
- *Controle para amortecimento de oscilações* - Entre os principais desafios que surgem com a medição fasorial sincronizada, destaca-se o controle de oscilações eletromecânicas. Com o domínio dessa técnica será possível operar o sistema elétrico mais perto dos limites de estabilidade e com maior segurança, reduzindo assim o custo da operação. No âmbito do projeto MedFasee esse tema foi explorado nos trabalhos de Dotta (2009) e Prioste (2012). Dotta (2012) propõe um sistema de controle centralizado que utiliza sincrofasores para alimentar controladores dos modos de oscilações conhecidos em um sistema. No trabalho de Prioste (2011), avaliam-se os resultados da aplicação de diferentes métodos e estruturas de projeto de controladores, utilizando dados de SPMS como realimentação.
- **Aplicações Especiais:** avaliam a confiabilidade dos resultados fornecidos pelos modelos de simulação e fornecem informações que contribuem para a atualização e correção destes modelos.
  - *Validação de modelos de simulação* - Para o operador do sistema elétrico é importante que os modelos de simulação retratem de maneira fiel as características dos sistemas elétricos reais. Uma forma de se verificar a aderência dos modelos é utilizar os registros de uma perturbação real monitorada através dos SPMS e reproduzir estes eventos no modelo de simulação. Dessa maneira, é possível avaliar a qualidade dos modelos de simulação e identificar os possíveis problemas presentes no modelo. Para esse tema, referenciam-se os trabalhos de

Kosterev (2004), Bertsch *et al.* (2004) e Scala *et al.*, (2006) e alguns trabalhos que também são elaborados no projeto MedFasee. Mencionam-se os trabalhos de Decker *et al.* (2010) e Gavioli *et al.* (2011) que utilizam os dados do SPMS MedFasee BT para a validação de modelos de simulação do sistema elétrico brasileiro a partir de eventos registrados na rede. O trabalho de Trevisan (2011) objetiva especificamente a validação de modelos de unidades geradoras. Cita-se também o trabalho de Gomez *et al.* (2012) que foca a validação dos modelos de simulação do sistema elétrico colombiano.

- *Estimação de parâmetros de LTs* - A estimação de parâmetros em uma linha de transmissão pode ser utilizada para ajustar os modelos de simulação, por exemplo, determinação de parâmetros pré-falta de uma linha. Os valores fornecidos por projeto variam de acordo com determinadas condições, como: temperatura, deterioração dos materiais, condição de operação, entre outros. Devido a esses requisitos, a medição fasorial possibilita a estimação dos parâmetros mencionados, como realizado por Lan *et al.* (2011). No âmbito do projeto MedFasee tem-se neste sentido o trabalho de Lira (2010) que leva em consideração ainda o erro causado pelos transformadores de instrumentação.
- *Localização de faltas* - O prejuízo ocasionado pela perda de uma linha de transmissão é uma preocupação de todo o agente transmissor. Muitas vezes os curtos-circuitos em uma linha de transmissão são ocasionados pelo contato da vegetação com a linha, pela danificação de isoladores, pela queda de torres, etc. Como as linhas normalmente são de dezenas de quilômetros, é importante que se tenham ferramentas adequadas para facilitar a identificação do local da falta e acelerar o processo de recomposição da linha. Com os SPMS é possível aplicar metodologias de localização de falta, como feito no trabalho de Benetti (2009), Projeto MedFasee, em que são apresentadas diversas metodologias e estudo de casos do sistema elétrico brasileiro.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2, descreve-se o ambiente de desenvolvimento de aplicativos para o processamento de dados fasoriais sincronizados e realização de estudos do comportamento do sistema elétrico implementado neste trabalho. São descritas as características, as funcionalidades e a interface gráfica de interação com o usuário.

No capítulo 3 são apresentados os conceitos sobre oscilações eletromecânicas de forma a contextualizar o assunto, as formulações matemáticas básicas para a identificação de oscilações eletromecânicas e suas características como frequência, amortecimento, amplitude, fase e formas modais. Também neste capítulo é descrito um conjunto de métodos de identificação de oscilações eletromecânicas, sendo eles os métodos de Prony, HTLS, Feixe de Matrizes, DFT, N4SID, Realização Balanceada Estocástica e Wiener-Hopf. Assim como algoritmos para a implementação computacional destes métodos.

No capítulo 4 são apresentadas propostas de ajustes de parâmetros para a correta aplicação dos métodos descritos no capítulo 3 em dados de sincrofasores. Estes ajustes estão relacionados à ordem do modelo, tamanho da janela de tempo, taxa de amostragem, entre outras.

No capítulo 5 são demonstradas algumas das funcionalidades do DFAM, bem como a utilização desse ambiente na validação das metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas e dos ajustes de parâmetros propostos.

Por fim, no capítulo 6, são feitas as considerações finais em que se apresentam as principais conclusões, contribuições, dificuldades encontradas na elaboração deste trabalho, assim como as propostas de trabalhos futuros.

## 2 DFAM - AMBIENTE MATLAB DE ANÁLISE DE DADOS FASORIAIS

O presente capítulo descreve o ambiente computacional construído para servir de base ao desenvolvimento e testes de metodologias, prototipação de programas computacionais e estudos do comportamento do SIN a partir de sincrofasores. Este aplicativo contempla cinco módulos de análise: Análise em Regime Permanente, Análise de Ocorrências, Análise de Qualidade de Energia Elétrica, Detecção e Identificação de Eventos e Análise de Oscilações Eletromecânicas. São descritas as funcionalidades e metodologias já disponíveis nestes módulos tais como: cálculo de fluxo de potência, perdas em linhas de transmissão, localização de faltas em linhas de transmissão, identificação de oscilações eletromecânicas, indicadores de qualidade de energia, entre outros. Por fim, são apresentadas as interfaces gráficas das janelas do ambiente desenvolvido. As indicações das variáveis necessárias para o desenvolvimento de novas metodologias e os arquivos de entrada de dados padronizados são apresentados nos apêndices.

### 2.1 OBJETIVOS

O ambiente computacional desenvolvido foi denominado DFAM (lê-se “*defam*”), como referência aos sinais básicos de um SPMS, que são Dados de Frequência, Ângulos e Módulos de tensão e corrente. Para a concepção do DFAM, partiu-se de uma estrutura inicial desenvolvida em Jeremias (2009), no entanto, nesta época o ambiente tinha como objetivo apenas o esboço dos sinais medidos ao longo do tempo. Para este trabalho, os objetivos são:

- **Base para os desenvolvimentos de pesquisa:**

O DFAM serve de suporte à implementação e testes de metodologias para o processamento de dados fasoriais. Esta ferramenta disponibiliza uma base de desenvolvimentos, para que seja possível a elaboração de aplicativos de forma independente. Assim assegura-se a fácil integralização de todos os desenvolvimentos do grupo de pesquisa, uma vez que são desenvolvidos a partir desta mesma base. Desta forma, ocorre uma melhoria na organização, disponibilização e padronização das novas funcionalidades.

- **Prototipação:**

O DFAM pode ser utilizado para o teste de algoritmos, facilitando a detecção e correção de erros. Para isso, foi desenvolvido em Matlab®, cuja linguagem computacional é interpretada e semelhante ao C/C++, facilitando a conversão dos desenvolvimentos para outros compiladores.

- **Interface gráfica:**

O DFAM proporciona simplicidade, clareza e praticidade em sua utilização. Possui interface gráfica amigável para que os estudos possam ser facilitados e a utilização do ambiente seja feita de forma intuitiva.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS

O ambiente computacional foi elaborado para fins acadêmicos, de forma a auxiliar em estudos de sistemas elétricos e é destinado a professores, estudantes de graduação, pós-graduação e pesquisadores que trabalhem ou tenham conhecimento de sistemas de medição fasorial sincronizada.

Para atender aos objetivos, optou-se por desenvolver o ambiente utilizando o programa Matlab®, produto da MathWorks Company®, por ser um programa de alta performance voltado para o cálculo numérico. Dessa maneira, tem-se incorporado nesse ambiente computacional as facilidades proporcionadas pelo Matlab®, tais como:

- **Operações matemáticas.**

Pode-se afirmar que esta é a principal vantagem proporcionada pelo Matlab®. O programa permite operações com vetores e matrizes de uma forma simplificada, não sendo necessário que o usuário programe toda a lógica, por exemplo, para um produto matricial, inversão de matrizes, soluções de sistemas lineares, cálculo de autovalores e autovetores, entre outras. Embora o ambiente disponibilize diversas funções pré-programadas, as metodologias de análise de oscilações apresentadas na sequência foram todas implementadas, aproveitando-se apenas as funcionalidades matemáticas básicas.

- **GUI layout editor.**

O Matlab® possui recursos gráficos de programação que proporcionam facilidades na construção da interface homem-máquina.

- **Linguagem C/C++.**

A linguagem computacional utilizada no desenvolvimento do ambiente é muito semelhante à linguagem de programação C/C++. Com isso, os algoritmos testados podem ser convertidos para esta linguagem reduzindo o esforço de programação, o que auxilia no desenvolvimento de programas de mais alto-nível.

- **Detecção de erros.**

O Matlab®, por ser uma linguagem interpretada, permite que os códigos fonte sejam executados mesmo com a presença de erros de programação. Isso é utilizado a favor do programador no momento de identificar os erros, pois o próprio Matlab® gera relatórios identificando a linha e as possíveis causas do erro, o que facilita a correção.

Além das vantagens proporcionadas pelo Matlab®, o ambiente possui outras características importantes, atribuídas devido à forma com que foi desenvolvido neste trabalho, em que se destacam:

- **Expansibilidade.**

O DFAM disponibiliza os dados fásoriais em um conjunto de variáveis, apresentadas no Apêndice A – Variáveis do DFAM, que são necessárias para a implantação de novos métodos no formato padronizado. Com isto, diferentes funcionalidades podem ser incorporadas de forma independente, seguindo o padrão proposto. Essa configuração permite que diferentes desenvolvimentos sejam realizados simultaneamente e para isso basta incluir os arquivos que contenham os novos códigos, sem a necessidade de aguardar o término de outros possíveis trabalhos.

- **Confiabilidade.**

O DFAM possui um sistema de autorrecuperação, o que significa dizer que quando uma nova funcionalidade for incorporada e falhar durante a execução, o ambiente automaticamente se protege e retorna a tela principal de funcionalidades. Esta característica evita a quebra do programa ou o travamento do sistema operacional. Utilizando os recursos do próprio Matlab®, é gerado um relatório com as possíveis causas do erro, facilitando a correção por parte do programador.

- **Interface gráfica.**

Com o auxílio do GUI *layout editor* do Matlab®, foi possível atribuir ao ambiente uma interface gráfica adequada, de forma a permitir que o usuário possa utilizá-lo intuitivamente, seguindo alguns padrões de programas comerciais, descritos na sequência.

### 2.3 FUNCIONALIDADES

O DFAM possui acesso indireto aos dados do PDC. O acesso aos dados é feito utilizando o programa MDF (DECKER *et al.*, 2011) ou MedPlot (LEANDRO, 2011), desenvolvidos no âmbito do Projeto MedFasee CTEEP e MedFasee BT, respectivamente. Estes programas criam arquivos do tipo ‘.dat’ (MDF) ou ‘.txt’ (MedPlot), com as grandezas medidas, sendo um arquivo para cada ponto de medição (PMU) consultado. Esses arquivos gerados servem de entrada ao DFAM e estão apresentados no Apêndice B – Arquivos de entrada. Nesse ponto, ressalta-se a capacidade do DFAM em processar sincrofasores de quaisquer SPMS, desde que os arquivos de entrada de dados estejam no padrão definido (Apêndice B – Arquivos de entrada).

O DFAM está estruturado em cinco módulos de análise, esquematizados na Figura 2.1, sendo eles: Análise em Regime Permanente; Análise de Ocorrências; Análise de Qualidade de Energia Elétrica; Detecção e Identificação de Eventos e Análise de Oscilações Eletromecânicas.

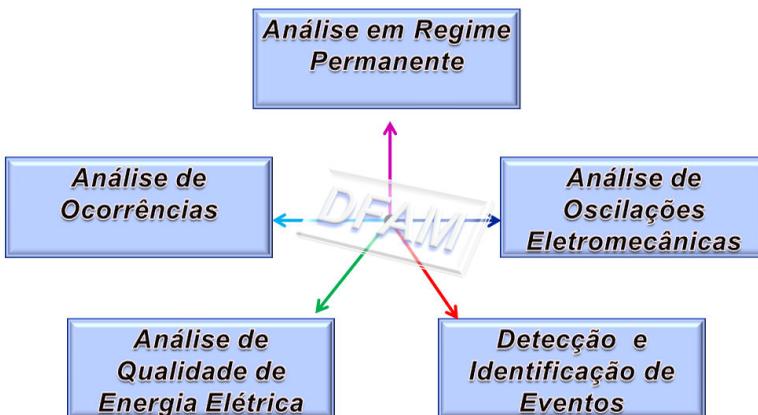


Figura 2.1 – Módulos de análise do DFAM.

A estruturação em módulos proporciona a característica da expansibilidade, pois diferentes estudos e desenvolvimentos podem ser realizados simultaneamente. Por exemplo, o grupo que estiver trabalhando com qualidade de energia elétrica realiza os desenvolvimentos relacionados a este módulo sem depender do término das implementações do grupo que estiver trabalhando com detecção e identificação de evento. Dessa forma, a integralização desses dois desenvolvimentos pode ser feita de maneira centralizada bastando que sejam apenas incorporados os códigos-fonte à base existente.

Cada um destes módulos possui um conjunto de funcionalidades que são descritas na sequência.

### **2.3.1 Módulo 1 – Análise em Regime Permanente**

O módulo 1 é destinado ao estudo de sistemas elétricos em regime permanente. Neste módulo é possível observar os gráficos de frequência, de tensão e de diferenças angulares ao longo do tempo. Em SPMS instalados em linhas de transmissão com monitoramento de corrente é possível observar essa grandeza, assim como o fluxo de potência, as perdas em linhas de transmissão e o cálculo de parâmetros de linha. Os módulos de tensão e corrente podem ser vistos por fase, trifásico ou através das componentes simétricas (sequência positiva, negativa ou zero). Conhecidas as bases, as grandezas podem ser vistas em pu (por unidade). Estudos feitos neste módulo utilizam intervalos grandes de tempo que variam de 1h até 24h e, normalmente, são feitos com taxas de amostragem menores, como 1 a 10 fasores/s.

As PMUs medem apenas os fasores trifásicos de tensão e corrente. Logo, a determinação das demais grandezas não medidas são feitas matematicamente, de acordo com as descrições a seguir.

#### *a) Componentes simétricas.*

Em geral, as tensões e as correntes monitoradas nos sistemas elétricos estão desbalanceadas, principalmente nas redes de baixa tensão. Por isso, utilizam-se as componentes simétricas que permitem que medidas não balanceadas de tensão e corrente sejam decompostas em três componentes simétricas balanceadas, tal que a soma destas componentes resultem nos fasores desbalanceados iniciais.

A Figura 2.2 ilustra os fasores de sequência positiva, negativa e de sequência zero respectivamente. É comum utilizar o índice ‘1’ para representar a componente de sequência ‘+’, bem como os índices ‘2’ e

‘0’ para representar as componentes de seqüência ‘-’ e ‘0’, respectivamente. (SAADAT 1999, p. 400).

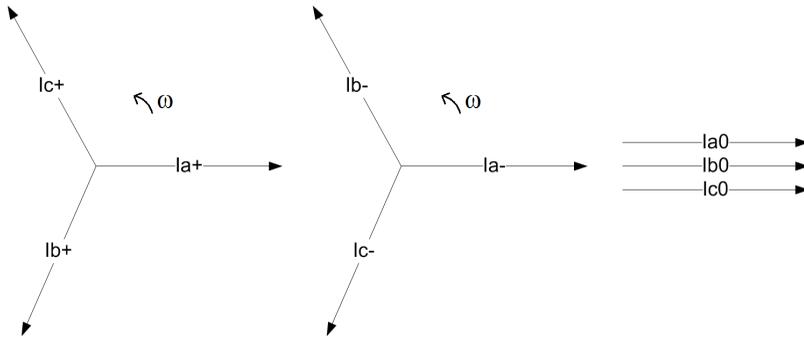


Figura 2.2 – Componentes simétricas. Seqüência positiva, negativa e zero.

Conhecidos os fasores de tensão das fases A, B e C, os fasores de tensão da fase ‘A’ de seqüência positiva, negativa e zero são obtidos através de (2.1), em que  $a = 1\angle 120^\circ$  e  $a^2 = 1\angle 240^\circ$ .

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Observe-se que a equação (2.1) fornece apenas os valores para a fase ‘A’ das componentes simétricas. Portanto, para obter os valores das demais fases utilizam-se as relações (2.2), (2.3) e (2.4).

$$\begin{aligned} V_a^1 &= V_a^1 \\ V_b^1 &= a^2 V_a^1 \\ V_c^1 &= a V_a^1 \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} V_a^2 &= V_a^2 \\ V_b^2 &= a V_a^2 \\ V_c^2 &= a^2 V_a^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$V_a^0 = V_b^0 = V_c^0 \quad (2.4)$$

Para o cálculo das componentes simétricas de corrente o procedimento é exatamente o mesmo descrito anteriormente, apenas substituindo-se os fasores de tensão  $V$  pelos fasores de corrente  $I$ .

b) *Cálculo da frequência.*

A PMU necessita calcular o valor da frequência do sistema para que seja possível estimar o fasor. No entanto, por questões de economia de memória no PDC, optou-se em não armazenar essa grandeza, pois, quando necessário, é possível obtê-la matematicamente utilizando os conceitos de frequência angular (HALLIDAY *et al.*, 1996). Sabe-se que:

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi}$$

$$f = \frac{\delta_{i-1}^{rad} - \delta_i^{rad}}{2 \cdot \pi \cdot \Delta t} = \frac{\delta_{i-1}^{\circ} - \delta_i^{\circ}}{2 \cdot \pi \cdot \Delta t} \times \frac{\pi}{180^{\circ}}$$

O intervalo de tempo utilizado no cálculo da frequência varia de acordo com a taxa de amostragem utilizada na busca dos dados. Se a consulta foi feita com uma taxa de amostragem de  $TA$  fasores/s,  $\Delta t = 1/TA$ . Desta forma, a frequência é calculada por (2.5).

$$f = f_0 + \frac{\delta_{i-1}^{\circ} - \delta_i^{\circ}}{360^{\circ}} \times TA \quad (2.5)$$

É possível calcular a frequência dos fasores de tensão e corrente das fases A, B e C independentemente, bem como a frequência dos fasores das componentes simétricas. Porém, no DFAM optou-se por utilizar a frequência da tensão de sequência positiva para aproximar a frequência do sistema elétrico.

As taxas de amostragem comumente utilizadas pelo SPMS MedFasee são de 60, 30, 20, 10 e 1 fasor/s, sendo esta última não recomendada para a análise do sinal de frequência e análise de oscilações eletromecânicas, como será visto na Seção 4.2.

c) *Diferenças angulares.*

Uma característica importante da medição fasorial sincronizada é a possibilidade de medição de ângulo. No DFAM é possível obter informações relativas a diferença angular entre as tensões de sequência

positiva medidas nas diversas PMUs. Para isto basta selecionar um dos terminais como referência.

Alternativamente, pode-se optar pela criação de uma barra virtual de referência, neste caso todas as PMUs são utilizadas para o cálculo de uma referência virtual. De maneira simplificada, a referência virtual é calculada como uma média aritmética do ângulo de todas as PMUs. Essa metodologia foi publicada em Zuo *et al.* (2008) e adaptada para os sincrofasores do projeto MedFasee em Jeremias (2009) “Implementação de uma Barra Virtual de Referência Angular para a Visualização de Sincrofasores”.

No caso do SPMS MedFasee BT é preciso estar ciente de que os valores angulares medidos estão sujeitos à influência dos transformadores delta – estrela utilizados nos sistemas de distribuição de energia elétrica, e estes rotacionam os fasores em 30°. No DFAM não são feitas compensações para estes efeitos. Apesar disso, os valores das excursões e mudanças de patamares angulares fornecem informações sistêmicas relevantes, por exemplo, o indicativo de variações de intercâmbios de potência apresentado na Seção 3.4.

#### d) *Cálculo do fluxo de potência.*

Nos SPMS em que a monitoração de corrente estiver disponível é possível calcular o fluxo de potência em uma linha monitorada. Para este cálculo, determina-se a potência que flui em cada uma das fases, sendo a soma delas a potência total na linha de transmissão.

A potência que flui na fase A é dada por (2.6) (SAADAT, 1999).

$$S_a = V_a \cdot I_a^* = V \cdot I \angle (\delta_{V_a} - \delta_{I_a}) \quad (2.6)$$

Separando em componentes de potência ativa e reativa, obtêm-se as relações (2.7) e (2.8) respectivamente.

$$P_a = V_a \cdot I_a \cdot \cos(\delta_{V_a} - \delta_{I_a}) \quad (2.7)$$

$$Q_a = V_a \cdot I_a \cdot \sin(\delta_{V_a} - \delta_{I_a}) \quad (2.8)$$

A potência total é dada pela soma das potências das fases A, B e C, calculadas aplicando as mesmas equações (2.7) e (2.8) para as fases B e C. Com isso, tem-se:

$$P_{3\phi} = P_a + P_b + P_c \quad (2.9)$$

$$Q_{3\phi} = Q_a + Q_b + Q_c \quad (2.10)$$

e) *Cálculo das Perdas em Linhas de Transmissão.*

No DFAM, o cálculo das perdas de potência ativa em linhas de transmissão pode ser feito de duas maneiras. A primeira delas é utilizando a conservação da energia, ou seja, a potência  $P_1$  injetada em uma extremidade da linha é igual à potência  $P_2$  extraída na outra extremidade adicionada das perdas. Com isso, as perdas de potência ativa são determinadas por (2.11).

$$P_{\text{perdas}} = \left| |P_1| - |P_2| \right| \quad (2.11)$$

Outra forma de estimar as perdas é utilizar os conceitos de fluxo de potência em LTs (Saadat, 1999 p.212). Considerando uma linha de transmissão, de acordo com a Figura 2.3, é possível calcular o fluxo de potência utilizando os parâmetros de seu circuito  $\pi$  equivalente, por (2.12) e (2.13). No caso do SIN, esses parâmetros podem ser obtidos pelo Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN – SINDAT (ONS, 2011).

$$S_{ij} = V_i \cdot [y_{ij} \cdot (V_i - V_j) - V_i \cdot y_{i0}] \quad (2.12)$$

$$S_{ji} = V_j \cdot [y_{ji} \cdot (V_j - V_i) - V_j \cdot y_{j0}] \quad (2.13)$$

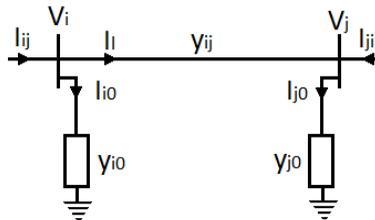


Figura 2.3 – Fluxo de potência em uma LT,

Assim, estimam-se as perdas por (2.14) que considera como perdas a diferença entre a potência no terminal emissor ( $i$ ) e a potência no terminal receptor ( $j$ ).

$$S_L = S_{ij} - S_{ji} \quad (2.14)$$

A potência complexa associada às perdas pode ser separada em perdas de potência ativa e reativa. Para isso, decompõe-se  $S_L$  em parte real e imaginária. No DFAM não foram implementados os cálculos de perdas de potência reativa, pois são necessárias informações adicionais às medidas pelos SPMS, como instantes em que os compensadores estarão em atuação e a topologia do sistema, ou seja, se a medição é a montante ou a jusante do compensador e se a compensação é feita através de reatores de linha ou banco de capacitores na barra.

f) *Parâmetros de linhas de transmissão.*

A estimação dos parâmetros em uma linha de transmissão no DFAM pode ser feita utilizando três diferentes métodos, implementados nos trabalhos de Benetti (2009) e Lira (2010):

- *Método Quadripolo:* utiliza a representação da linha de transmissão por um quadripolo, representado pela Figura 2.4. A partir dos coeficientes A, B, C e D, encontrados através das relações entre os fasores de tensão e corrente sincronizados, determinam-se os parâmetros da linha.

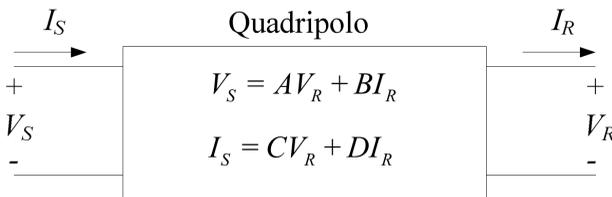


Figura 2.4 – Representação de LT por um quadripolo.

- *Método Circuito Trifásico Equivalente  $\pi$ :* neste modelo são levados em consideração os fasores de tensão e corrente das três fases, e a representação da LT é feita como na Figura 2.5.

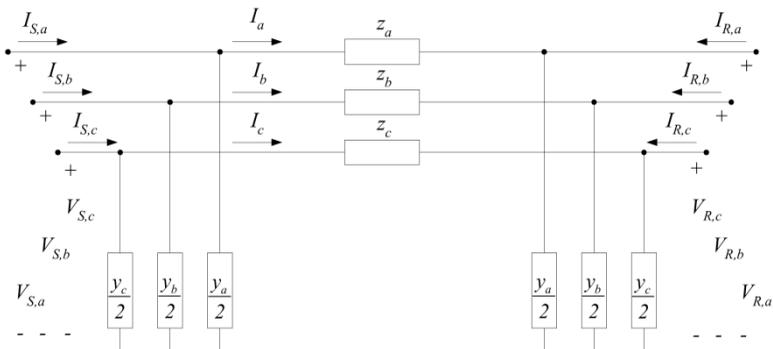


Figura 2.5 – Modelo  $\pi$  trifásico de uma LT

- *Método Circuitos Equivalentes  $\pi$  de Sequência +*: os parâmetros da LT são obtidos a partir dos fasores de tensão e corrente de seqüência positiva, no qual o modelo está ilustrado na Figura 2.6.

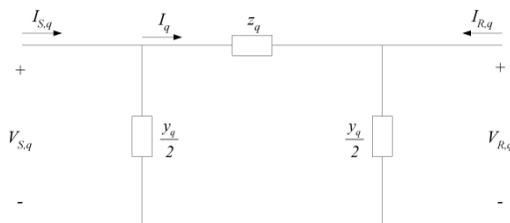


Figura 2.6 – Modelo  $\pi$  de seqüência positiva de uma LT.

Essa funcionalidade está disponível no DFAM e foi desenvolvida no âmbito do projeto MedFasee, o que ilustra a possibilidade dos desenvolvimentos independentes e a possibilidade de adequar as metodologias desenvolvidas antes do DFAM e incorporá-las a esse novo ambiente.

### 2.3.2 Módulo 2 – Análise de Ocorrências

O módulo 2 disponibiliza metodologias para a análise de ocorrências no SIN, em que é possível observar as grandezas ao longo do tempo. A diferença do módulo 2 em relação ao módulo 1 é o foco no comportamento dinâmico do sistema elétrico. Além das funcionalidades de gráficos no tempo, estão incorporadas a este módulo as análises de

oscilações eletromecânicas, a localização de faltas em linhas de transmissão e a observação do desempenho dos esquemas de proteção. Os estudos realizados neste módulo utilizam intervalos de tempo que variam de 1 a 30 min e taxa máxima de dados de 60 fasores/s, no caso do SPMS MedFasee.

Alguns aplicativos externos, desenvolvidos no âmbito do projeto MedFasee, já foram incorporados ao DFAM, descritos a seguir.

a) *Localização de faltas.*

As linhas de transmissão estão sujeitas a curtos-circuitos. Os grandes comprimentos de uma linha de transmissão, em geral maiores que 100 km, e os acessos em matas fechadas dificultam às equipes de manutenção encontrar o local exato do defeito.

Para auxiliar a equipe de manutenção, existem diversas metodologias que buscam estimar o local em que ocorreu a falha. O trabalho de Benetti (2009) faz uma abordagem deste tema e utiliza a medição fasorial sincronizada para estimar o local da ocorrência. As primeiras versões dos algoritmos desenvolvidos foram feitas antes do DFAM, logo, não eram compatíveis com este ambiente. Foram então feitas as adaptações necessárias, e as metodologias foram incorporadas ao DFAM, sendo elas:

- Método de Brahma; (BRAHMA *et al.*, 2004)
- Método Wang; (WANG *et al.*, 2007)
- Método Silveira; (SILVEIRA, 2007)
- Método Benetti. (BENETTI, 2009)

b) *Desempenho da proteção*

No momento em que um sistema elétrico é submetido a uma perturbação, os sistemas de proteção estão atuando. Com as grandezas elétricas monitoradas por um SPMS esboçadas em gráficos no tempo, é possível, através das discontinuidades dessas curvas, estimar os tempos de atuação de disjuntores, religadores, esquemas regionais de alívio de carga – ERAC, estabilizadores de sistemas de potência – PSS (Power System Stabilizer), entre outros.

Uma das funcionalidades de avaliação dos esquemas de proteção foi realizada por Brustolin (2012) que utiliza o DFAM para avaliar a atuação do ERAC. O ERAC é uma alternativa extrema, quando não é possível o restabelecimento do equilíbrio entre carga e geração, necessitando então que uma parcela da carga seja desligada. É de fundamental importância que os limites de atuação sejam respeitados,

para que se evite desligar cargas desnecessariamente. Desta forma, é possível utilizar o DFAM em conjunto com os desenvolvimentos de Brustolin (2012) para avaliar o desempenho desse esquema.

c) *Análise de oscilações.*

Na ocorrência de grandes perturbações surgem oscilações eletromecânicas no sistema elétrico. Estas oscilações podem causar grandes danos aos geradores, ocasionados por efeitos torcionais no eixo dos geradores, limitar o intercâmbio de potência e provocar grandes colapsos nos sistemas elétricos. Devido à importância do tema, criou-se um módulo exclusivo para o desenvolvimento de metodologias de identificação que devem ser utilizadas juntamente com o módulo de análise de ocorrência. Portanto, a descrição mais detalhada desse tópico é apresentada na Seção 2.3.5 Módulo 5 – Análise de Oscilações Eletromecânicas.

d) *Apoio à validação de modelos dinâmicos.*

No setor elétrico, a simulação de eventos na rede é de grande importância em estudos de planejamento. Para que estas simulações sejam confiáveis, é importante ter modelos bem ajustados. Uma das formas de fazer este ajuste é reproduzir, através de simulações, eventos reais no SIN. Como os SPMS estão constantemente monitorando a rede elétrica, os dados de simulação são comparados aos dados medidos. Com isso, utilizam-se os gráficos gerados no DFAM para fazer as comparações, conforme abordado por Decker *et al.* (2010) e Gavioli *et al.* (2011).

### **2.3.3 Módulo 3 – Análise de Qualidade de Energia Elétrica**

No módulo 3 aplicam-se os indicadores de qualidade de energia elétrica. Embora os requisitos exigidos pelo módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2012) refiram-se, em sua maioria, à forma de onda, é possível estimar alguns dos indicadores através de fasores, como os índices de desequilíbrio e a violação de limites de tensão e frequência.

Na sequência, apresentam-se os indicadores que já estão implementados no DFAM.

a) *Cálculo dos índices de desequilíbrio.*

O índice de desequilíbrio de tensão é calculado por (2.15), em que  $V_-$  indica tensão de sequência negativa e  $V_+$  tensão de sequência

positiva. Para a corrente a equação é exatamente a mesma, trocando  $V$  por  $I$ . (FILHO *et al.*, 2005) e (ANEEL, 2012).

$$K(\%) = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (2.15)$$

Com os valores de  $K$  é possível esboçar os gráficos de desequilíbrios ao longo do tempo. A partir desses gráficos observa-se, por exemplo, a influência do carregamento do SIN, ou ainda a influência dos canais de instrumentação nas medidas fasoriais (BENETTI *et al.*, 2012).

b) *Diferenças de módulos e ângulos entre fases.*

Em sistemas trifásicos equilibrados os módulos das tensões das fases A, B e C são iguais. Consequentemente, a diferença entre estes módulos é nula. Uma forma de acompanhar o desequilíbrio entre as fases é calcular a diferença entre os módulos das fases através de (2.16). Os valores calculados podem ser esboçados em curvas ao longo do tempo, permitindo visualizar os períodos do dia em que os desequilíbrios aumentam. A mesma equação é utilizada para determinar as diferenças entre os módulos de corrente, substituindo apenas a tensão  $V$  pela corrente  $I$ .

$$\begin{aligned} V_{a-b} &= |V_a| - |V_b| \\ V_{b-c} &= |V_b| - |V_c| \\ V_{c-a} &= |V_c| - |V_a| \end{aligned} \quad (2.16)$$

Além da análise em termos de módulo, pode-se efetuar a análise em termos do desequilíbrio angular. Neste caso, é desejável que as diferenças angulares entre as fases sejam de  $120^\circ$ . Utilizando a equação (2.17), é possível acompanhar a defasagem angular entre as fases ao longo do tempo.

$$\begin{aligned} \delta_{a-b} &= |\delta_a| - |\delta_b| \\ \delta_{b-c} &= |\delta_b| - |\delta_c| \\ \delta_{c-a} &= |\delta_c| - |\delta_a| \end{aligned} \quad (2.17)$$

O DFAM possui ainda a contribuição de pesquisadores de Iniciação Científica que implementaram análises de conformidade do nível de tensão e frequência, classificando os valores medidos como:

Adequado, Crítico ou Precário de acordo com os índices estabelecidos no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2012).

### **2.3.4 Módulo 4 – Detecção e Identificação de Eventos**

O módulo 4 tem por objetivo detectar e identificar eventos em sistemas elétricos de maneira automática. Para isso, podem ser utilizadas técnicas baseadas na Transformada Wavelet (SANTOSO *et al.*, 1997) e em filtros de Kalman (ZHAO *et al.*, 2008).

Os desenvolvimentos no âmbito do Projeto MedFasee realizados neste módulo são de Brustolin *et al.* (2012), que aplica a transformada Wavelet para a identificação de eventos, voltados principalmente para a identificação dos instantes de tempo de atuação do ERAC, ilhamentos e recomposição. Outro trabalho que utiliza o ambiente DFAM para detecção e identificação de eventos sistêmicos é de Zimmer *et al.* (2012) que utiliza técnicas baseadas na taxa de variação de frequência e filtros de Kalman para identificar o instante de tempo, o local aproximado de uma perturbação e observar a propagação do evento em todo o sistema elétrico.

### **2.3.5 Módulo 5 – Análise de Oscilações Eletromecânicas**

O módulo 5 é utilizado para o desenvolvimento, testes e aperfeiçoamento de metodologias para a análise de oscilações eletromecânicas em sistemas elétricos. As metodologias aprimoradas e testadas neste módulo são utilizadas em comum com os módulos 1 e 2 de análise em regime permanente (dados ambiente) e de análise de ocorrências (*ringdown*).

Os métodos de identificação de oscilações eletromecânicas disponibilizados no módulo 5 do DFAM estão descritos com maiores detalhes no Capítulo 3 e 4. Em síntese, foram abordados métodos com as seguintes características:

- a) *Métodos baseados na Transformada Discreta de Fourier;*
- b) *Métodos baseados na Correlação entre pontos;*
- c) *Métodos baseados na reconstrução do sinal;*

d) *Métodos de estimação do modelo linear do sistema (subespaço de estados).*

## 2.4 INTERFACE GRÁFICA

O ambiente DFAM foi desenvolvido utilizando o programa Matlab®, através do recurso *GUI Layout editor*. Na sequência são apresentados os ambientes principais para a interação homem-máquina.

### 2.4.1 Janela de abertura

Ao ser inicializado, o DFAM apresenta ao usuário a janela ilustrada na Figura 2.7.

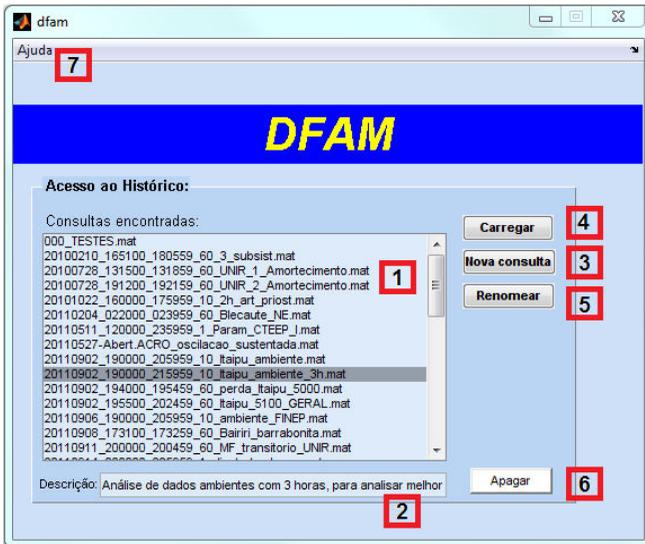


Figura 2.7 – Janela de abertura do DFAM.

De acordo com a numeração atribuída na Figura 2.7, tem-se:

(1) *Consultas encontradas* - Histórico de todas as consultas que já foram realizadas no PDC, carregadas para o DFAM e que se encontram disponíveis para análise. O nome de cada uma dessas consultas é atribuído pelo usuário, que pode aproveitar o nome para caracterizar o

conjunto de dados, utilizando o dia e o instante de tempo, bem como palavras indicando o evento e local, por exemplo, “Abertura”, “Desligamento\_UHE\_Itaipu”, “Curto\_circuito\_LT\_XX”.

(2) *Descrição* - Cada uma dessas consultas permite uma descrição mais detalhada para auxiliar o usuário a lembrar do que se trata aquela busca. Esta descrição é então apresentada neste campo.

(3) *Nova consulta* – para consultar os dados no PDC é necessário utilizar os programas MDF ou MedPlot (Seção 2.3). Esses programas disponibilizam arquivos do tipo “.dat” ou “.txt” com os dados de interesse. Estando os dados disponíveis é por este botão “*Nova Consulta*” que será feita a leitura dos dados e a padronização no formato DFAM. Para isso, será necessário informar o diretório em que os dados estão armazenados, incluir um nome para a consulta e inserir a descrição desejada. Com isto, será criado um novo arquivo do tipo ‘.mat’ e incorporado à lista de consultas encontradas.

(4) *Carregar* - Cada conjunto de dados gerados fica armazenado em arquivos ‘.mat’ no disco 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 desse botão.

(7) *Ajuda* - Seguindo os padrões de programas comerciais, o item “Ajuda” possui o recurso “Sobre”, ilustrado na Figura 2.8 que apresenta as versões do ambiente e atribui os créditos aos colaboradores.

## 2.4.2 Janela de funcionalidades

Quando um conjunto de dados é carregado, abre-se uma nova janela com as funcionalidades disponíveis. A Figura 2.9 apresenta o painel principal em que as funcionalidades estão disponíveis para a utilização.



Figura 2.8 – Sobre.

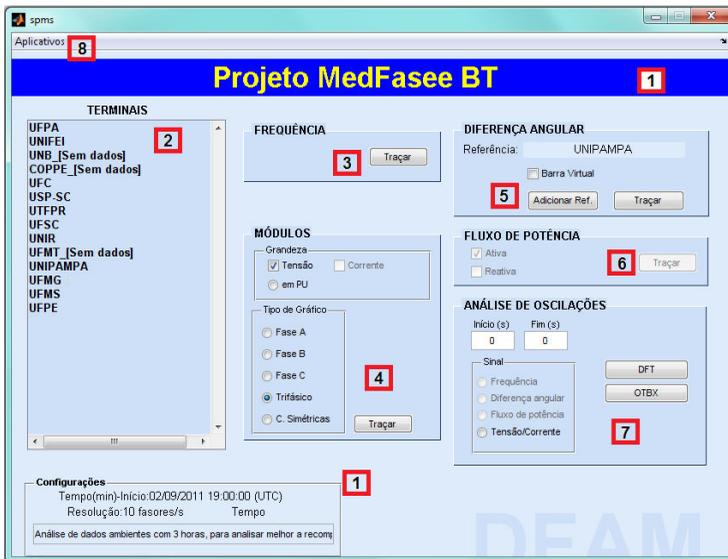


Figura 2.9 – Janela de funcionalidades.

De acordo com a numeração atribuída na Figura 2.9, tem-se:

(1) *Nome do SPMS* - O ambiente é compatível com qualquer SPMS que siga os padrões definidos no Projeto MedFasee. Dessa forma,

tem-se um espaço destinado à identificação do SPMS, no qual o conjunto de dados faz parte. No caso do exemplo apresentado na Figura 2.9, trata-se do “*SPMS MedFasee BT*”. Na parte mais abaixo desta figura, tem-se a identificação do período inicial da busca, a taxa de amostragem, ou seja, número de fasores por segundo e o tempo total da janela. De acordo com o tamanho da janela de buscas, o ambiente automaticamente ajustará o eixo dos tempos nos gráficos. Quando o tempo for menor que 1h, as unidades ficam definidas em segundos. Para tempos entre 1h e 3h, as unidades ficam definidas em minutos e para tempos superiores a 3h as unidades aparecem em horas.

(2) *Terminais* - São apresentadas nessa lista todas as PMUs disponíveis do SPMS para seleção. Para buscas no PDC via programa MDF (DECKER *et al.*, 2011), quando algum dos terminais não estiver disponível, seja por falta de dados ou por não inclusão na busca, o DFAM sinaliza este terminal com uma etiqueta [*Sem dados*], o que alerta ao usuário de que o terminal pertence ao SPMS, mas seus dados não estão disponíveis. Como alternativa de proteção contra erros o DFAM não permite que esses terminais sejam selecionados. Quando a busca ao PDC for feita via MedPlot (LEANDRO, 2011) a PMU simplesmente não será incluída na lista.

(3) *Frequência* - Nessa funcionalidade é possível o esboço de gráficos de frequência, o cálculo é feito através da componente de sequência positiva da tensão (Seção 2.3.1). Como alternativa, são apresentados dois gráficos, o primeiro deles é o gráfico sem filtro e o outro com a aplicação de um filtro passa-baixas de 5 Hz para atenuação de ruídos.

(4) *Módulos* - Neste conjunto de funcionalidades são traçados os gráficos de tensão e corrente, seja em grandezas trifásicas, seja em componentes simétricas. Deve-se ressaltar que a corrente só estará liberada em SPMS que possuem medidas de corrente, o que não é o caso do SPMS MedFasee BT da figura apresentada.

(5) *Diferença angular* - Permite ao usuário observar a diferença angular de sequência positiva entre terminais. Assim, basta escolher a referência, que pode ser um terminal real ou a barra virtual, em seguida os demais terminais para que o gráfico seja traçado.

(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. Por ser utilizado com maior frequência, optou-se deixar um botão exclusivo

para o cálculo da DFT e no botão denominado ‘OTBX – *Oscillation ToolBox*’ acessa os métodos apresentados no capítulo 3.

(8) *Aplicativos* - A aba “Aplicativos” é destinada para acessar os demais desenvolvimentos, nessa opção são inseridos os diversos aplicativos desenvolvidos no âmbito do projeto, garantindo desta forma a facilidade de expansão. Isso significa que sempre que um novo conjunto de métodos for incorporado ao DFAM, estes deverão ser incluídos nesta parte do ambiente, ilustrada na Figura 2.10. Observe-se que nesta figura estão apresentados os aplicativos de Cálculo de Parâmetros em Linhas de Transmissão, Atuação do ERAC, Perdas em Linhas de Transmissão, Qualidade de Energia Elétrica e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão. Outros aplicativos podem ser incorporados ao ambiente de maneira facilitada, desde que sejam seguidos os padrões de acesso à base de dados disponibilizados pelo DFAM.

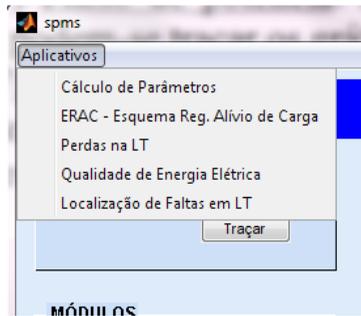


Figura 2.10 – Lista de aplicativos externos.

## 2.5 FUNÇÕES COMPLEMENTARES

Operando em conjunto com as funcionalidades apresentadas nos itens anteriores, o DFAM possui procedimentos que servem de auxílio aos aplicativos, e apesar de não estarem no primeiro plano do ambiente, são de grande importância nos resultados apresentados. Foram classificadas como funções complementares a filtragem e a reamostragem de sinais, na próxima seção é apresentada a filtragem utilizada e na Seção 4.2 é descrita a reamostragem.

### 2.5.1 Filtragem de sinais

A filtragem de sinais foi elaborada com o objetivo de atenuar eventuais ruídos dos dados analisados. Em SPMS o sinal que mais sofre influência de ruídos é a frequência. O principal fator que faz com que a frequência seja bastante afetada por ruídos está no fato de ser calculada com base na derivada do ângulo (Seção 2.3.1). Desta forma, uma variação no ângulo, por menor que seja, é amplificada no sinal de frequência.

Dessa maneira, apenas o sinal de frequência é filtrado. Contudo, o esboço do gráfico de frequência é feito com a filtragem passa-baixas e sem a filtragem, sendo facultado ao usuário optar entre elas.

O filtro utilizado é uma função disponível no Matlab®. Entre as diversas alternativas disponíveis nesse programa, optou-se por se utilizar um filtro passa-baixas elíptico, escolhido tanto pela simplicidade quanto pelos bons resultados fornecidos, utilizando as funções “*elip()*” e “*filter()*”. A frequência de corte está ajustada em 5 Hz, mas é possível alterar este valor de acordo com o interesse.

A Figura 2.11 apresenta o diagrama de Bode do filtro utilizado. Observe-se que até a frequência de 5 Hz (31,5 rad/s), faixa na qual estão contidas as oscilações eletromecânicas, a atenuação é praticamente nula, portanto o filtro não interfere significativamente na amplitude dos sinais.

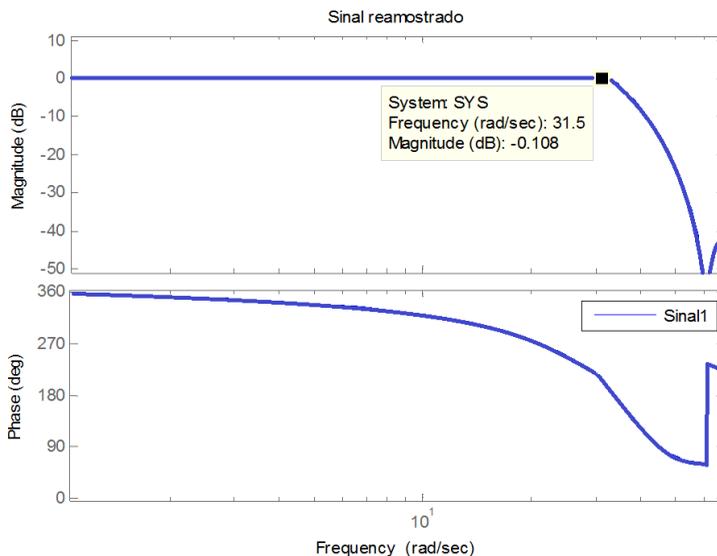


Figura 2.11 – Diagrama de Bode do Filtro de 5 Hz elíptico.

No caso do gráfico de fase do diagrama de Bode, percebe-se que o filtro altera a fase dos sinais mesmo para baixas frequências. Em análise de oscilações eletromecânicas isso não se torna um problema, uma vez que as componentes de mesma frequência serão igualmente afetadas. Por exemplo, suponha-se que um modo de oscilação se manifeste com 0,3 Hz em duas áreas distintas. Ao efetuar a filtragem dos sinais monitorados nestas áreas o deslocamento de fase para esta componente de 0,3 Hz será igual nos sinais das duas áreas, não afetando as análises.

Os demais sinais como tensão, corrente, diferença angular, fluxo de potência não são filtrados, pois o ruído não interfere significativamente nestes sinais.

## 2.6 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste capítulo foi descrito o ambiente computacional DFAM, suas características e funcionalidades básicas.

Esse ambiente tem sido fundamental nos desenvolvimentos, testes de metodologias e na elaboração de trabalhos científicos no âmbito do projeto MedFasee. A utilização do DFAM permitiu colaborar com o ONS em diversas análises de ocorrências do SIN, muitas dessas foram importantes para o completo esclarecimento de eventos no SIN.

A forma com que este aplicativo foi desenvolvido permite que ilimitadas aplicações sejam incrementadas, tornando o ambiente cada vez mais abrangente.

### 3 OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais envolvendo as oscilações eletromecânicas que servem de base para as metodologias de identificação. É apresentado o problema da estabilidade em sistemas elétricos de potência, bem como os conceitos envolvendo os modos de oscilações eletromecânicas, as classificações em modos intraplanta, locais e interárea, e a origem dos dados em *ringdown* e dados ambiente. Posteriormente, são descritos os fundamentos matemáticos básicos para a identificação dos modos de oscilação a partir do modelo linear de subespaço de estados e do modelo por função de transferência. Na sequência, apresentam-se as formulações matemáticas necessárias para extrair as características dos modos de oscilação, como frequência, amortecimento, amplitude, fase, energia e formas modais, considerando que o modelo do sistema é conhecido. Também são apresentados neste capítulo os principais modos de oscilação do sistema elétrico brasileiro. Por fim, são abordados métodos de identificação eletromecânicos classificados por métodos baseados no espectro de frequências (DFT), correlação (Wiener-Hopf), reconstrução do sinal (Prony, HTLS, Feixe de Matrizes) e estimação do modelo linear do sistema (N4SID e Realização Balanceada Estocástica).

#### 3.1 ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Os sistemas elétricos modernos e de grande dimensão, como é o caso do sistema elétrico brasileiro, possuem diversificados equipamentos que compõem a rede. Cada um desses equipamentos possuem características e taxas de respostas diferentes que contribuem para a resposta dinâmica do sistema elétrico como um todo. A estabilidade do sistema elétrico é a condição de equilíbrio entre estas forças de oposição (KUNDUR *et al.*, 2004).

A estabilidade é classificada de acordo com a natureza física do modo de instabilidade resultante, como dimensão do distúrbio considerado, local, equipamentos e processos envolvidos, bem como o tempo de distúrbio. Com isso, classifica-se a estabilidade em três categorias: estabilidade angular do rotor, estabilidade de tensão e estabilidade de frequência. (KUNDUR *et al.*, 2004).

A *estabilidade angular do rotor* define a capacidade das máquinas síncronas de um sistema em manterem o sincronismo após terem sido submetidas a um distúrbio. Estudos neste tema estão focados nas oscilações eletromecânicas ocorrentes em máquinas síncronas. Essas oscilações influem na potência gerada pela máquina que oscilará igualmente, podendo gerar grandes colapsos nos sistemas devido à atuação dos sistemas de proteção. O PSS (*Power System Stabilizer*) é o principal dispositivo utilizado em sistemas elétricos para o amortecimento dessas oscilações.

A estabilidade angular do rotor é ainda classificada em termos de *estabilidade a pequenos sinais* e *estabilidade transitória angular*. A estabilidade a pequenos sinais é a capacidade do sistema elétrico permanecer em sincronismo quando submetido a pequenos distúrbios, por exemplo, variações na carga e na geração. A estabilidade transitória angular é a capacidade do sistema elétrico permanecer em sincronismo quando submetido a uma grande perturbação, por exemplo, perda de grandes blocos de carga ou geração e curto-circuito.

A *estabilidade de tensão* refere-se a capacidade dos sistemas elétricos em manterem o nível de tensão dentro de limites adequados em todas as barras do sistema. Os principais dispositivos aplicados para evitar esse problema são os transformadores com *tap* variável, utilizados tanto nos sistemas de transmissão quanto nos de distribuição. A estabilidade de tensão é também classificada como *estabilidade a pequenos sinais* e *estabilidade a grandes perturbações*. Esses problemas podem ser de curta ou longa duração. Os problemas de curta duração estão associados às respostas transitórias do sistema, como ações de emergência, por exemplo, ERAC. Os problemas de longa duração estão associados às condições de regime permanente, por exemplo, carregamento de linhas de transmissão ou transformadores.

A *estabilidade de frequência* é a capacidade do sistema elétrico em manter a frequência nominal após a ocorrência de um desbalanço significativo entre carga e geração. Esta característica depende da capacidade do sistema manter ou então recuperar o equilíbrio entre carga e geração. Este problema pode ocorrer como consequência da ação da proteção contra a instabilidade angular do rotor, devido aos ilhamentos. Outras causas possíveis são a resposta inadequada de equipamentos de proteção e controle, ou reserva girante insuficiente.

Embora a estabilidade seja classificada separadamente, percebe-se que é possível que os problemas apareçam juntos, ou um em decorrência dos demais. Por exemplo, a perda de sincronismo entre áreas (estabilidade angular do rotor) pode necessitar isolar as áreas,

resultando em um desbalanço entre carga e geração (estabilidade de frequência) e níveis inadequados de tensão (estabilidade de tensão).

Este trabalho aborda o processo de identificação de oscilações eletromecânicas, que faz parte do problema de estabilidade angular do rotor.

### 3.2 CONCEITOS DE OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS

As oscilações eletromecânicas estão associadas ao problema de estabilidade angular do rotor e surgem nos sistemas elétricos de potência como característica das respostas transitórias a uma dada perturbação. Estas perturbações podem ser de grande intensidade, como um curto-circuito ou perda de grandes blocos de geração, ou de pequena intensidade como variações da carga, ajuste de tensão de excitação e chaveamento de banco de capacitores e reatores. Essas oscilações são de baixa frequência, até 2,5 Hz, e quando pouco amortecidas prejudicam a operação do sistema elétrico, podendo causar limitações nos intercâmbios de potência entre áreas e perda de sincronismo dos geradores. (OLIVEIRA *et al.* 2005, p.290).

As oscilações são classificadas como (KUNDUR, 1994):

- **Modos Intraplanta** estão relacionados às oscilações entre máquinas de uma mesma usina. Normalmente, essas oscilações encontram-se na faixa de frequência de 2 a 2,5 Hz.
- **Modos Locais** estão associados a uma pequena parte do sistema, não afetando significativamente as demais áreas. Isso ocorre quando uma usina oscila contra outra usina dentro de uma mesma área, gerando oscilações na faixa de 1 a 2 Hz.
- **Modos Interárea** envolvem um conjunto de máquinas de uma região que oscilam contra um conjunto de máquinas de outra região, gerando oscilações na faixa de 0,2 a 1 Hz que costumam serem as mais problemáticas em sistemas elétricos.

Como mencionado, as oscilações eletromecânicas são respostas dinâmicas do sistema elétrico e podem ser classificadas como (VANFRETTI *et al.*, 2010):

- **Ringdown** são transitórios de grande intensidade que geram oscilações em consequência de uma grande perturbação, como

abertura de linhas, curtos-circuitos, perda de grandes blocos de carga ou geração.

- **Dados ambiente** são transitórios de baixa intensidade em decorrência de pequenas perturbações. Esta condição está associada ao regime normal de operação, no qual se incluem as perturbações como as variações aleatórias da carga.

### 3.3 IDENTIFICAÇÃO DE OSCILAÇÕES A PARTIR DO MODELO LINEAR DO SISTEMA ELÉTRICO

O sistema elétrico pode ser modelado através das equações linearizadas de subespaço de estados (3.1) e representadas pela Figura 3.1 (VANFRETTI *et al.*, 2011):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A \cdot x(t) + B_E \cdot u_E(t) + B_L \cdot q(t) \\ y(t) &= C \cdot x(t) + D_E \cdot u_E(t) + D_L \cdot q(t) + \mu(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

em que  $A_{n \times n}$  é a matriz de estados,  $B_{n \times m}$  é a matriz de entradas,  $C_{l \times n}$  é a matriz de saídas e  $D_{l \times m}$  a matriz de transmissão direta. Onde  $n$  é a ordem do modelo,  $m$  é a quantidade de sinais de saída e  $l$  a quantidade de sinais de entrada.  $x$  é o vetor de estados,  $y$  são as medidas contaminadas com ruídos de medição  $\mu$  causados pelos equipamentos de instrumentação, canais de comunicação, entre outros.  $u_E$  é o vetor de entradas injetadas no sistema (sinal de sondagem) e  $q$  é um vetor aleatório de baixa amplitude que modela um ruído de entrada produzido pela variação de carga. Observa-se por esta equação que as matrizes  $B$  e  $D$  estão separadas em uma parte associada à entrada  $u_E$  e outra associada à entrada  $q$ .

A partir de (3.1) pode-se optar pela modelagem completa, determinística ou pela modelagem estocástica. Na modelagem completa todos os fatores são considerados. No modelo determinístico os sinais de entrada  $u_E$  e de saída  $y(t)$  são conhecidos e não existem ruídos na entrada e saída do sistema ( $q = \mu = 0$ ). No modelo estocástico são levados em consideração os efeitos do ruído na entrada e na saída do sistema, sendo uma aproximação mais adequada à realidade dos sistemas elétricos, uma vez que não se têm informações da entrada do sistema. (VAN OVERSCHEE e DE MOOR, 1996).

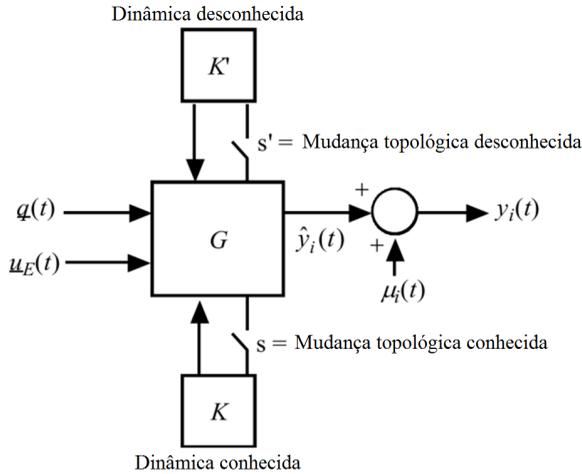


Figura 3.1 – Representação do modelo linear de um sistema dinâmico. (Vanfretti *et al.*, 2011)

Alternativamente, a modelagem do sistema elétrico pode ser feita através da função de transferência que relaciona a entrada com a saída, dada por (3.2) (CHEN, 1999):

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot B + D = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (3.2)$$

onde  $n$  é a ordem do modelo,  $R_i$  ( $i = 1 \dots n$ ) são os resíduos e  $\lambda_i$  ( $i = 1 \dots n$ ) são os polos da função de transferência  $G(s)$ .

A ordem  $n$  do modelo é definida pela dimensão da matriz de estados  $A$  de (3.1), ou pelo grau do polinômio  $D(s)$  em (3.2). Desta forma, as características dinâmicas do sistema elétrico, neste caso os modos de oscilações eletromecânicas são extraídos a partir dos autovalores da matriz de estados  $A$  (*autovalores*[ $A$ ]), ou dos polos da função de transferência  $G(s)$ . Os autovalores de  $A$  e os polos de  $G(s)$  serão iguais para o caso em que não ocorram cancelamentos entre polos e zeros. Desta forma, todos os polos de  $G(s)$  serão autovalores de  $A$ , mas a recíproca nem sempre será verdadeira (CHEN, 1999). Contudo, nos desenvolvimentos apresentados a seguir, considera-se a hipótese em que os *polos de*  $G(s) = \text{autovalores}(A) = \lambda_i$  com  $i = 1 \dots n$ .

Na sequência, são apresentadas as formulações matemáticas para obter as características dos modos de oscilação a partir dos valores de  $\lambda_i$

( $i = 1 \dots n$ ). Os procedimentos de cálculo para a obtenção dos valores de  $\lambda$  são apresentados a partir da Seção 3.5 que apresenta as metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas.

### 3.3.1 Características das oscilações

As características das oscilações eletromecânicas são extraídas a partir dos valores de  $\lambda_i$  ( $i = 1 \dots n$ ). Essas características de interesse são a Frequência ( $f$ ), a Amplitude ( $Am$ ), a Fase ( $\Phi$ ), o amortecimento ( $\xi$ ) e a energia ( $E$ ) do modo. Durante uma resposta transitória de um sistema dinâmico, essas características estão contidas diretamente no sinal de resposta e podem ser utilizadas para avaliar a estabilidade do sistema, principalmente em termos de amortecimento.

Utilizam-se os sinais da Figura 3.2 para ilustrar a manifestação de um modo de oscilação amortecido de 0,7 Hz, em áreas distintas. Essa característica é semelhante ao comportamento de grandezas elétricas, como frequência em duas áreas após uma grande perturbação. Nessa figura é possível observar como um modo de oscilação se manifesta na resposta transitória de um sistema dinâmico e possui características específicas de frequência, amortecimento, amplitude, fase e energia.

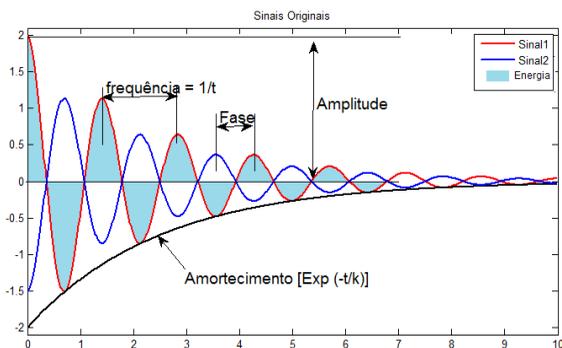


Figura 3.2 – Oscilação amortecida.

Uma oscilação amortecida pode ser decomposta por (3.3) (LIU *et al.*, 2007). Decompondo os sinais da Figura 3.2, tem-se que a quantidade ( $m$ ) de sinais é igual a 2, e que apenas um modo se manifesta neste exemplo, ou seja,  $n = 1$ .

$$y_m(t) = \sum_{i=1}^n e^{-\xi_i 2\pi f_i t} \cdot Am_i \cdot \text{sen}(2\pi f_i t + \Phi_i) \quad (3.3)$$

Os parâmetros  $f_i$ ,  $Am_i$ ,  $\Phi_i$  e  $\xi_i$  para  $i = 1 \dots n$  de (3.3) são obtidos matematicamente a partir dos polos ou autovalores ( $\lambda_i$ ) do modelo. Para isso, utiliza-se o modelo discreto (OGATA, 1995) ou o modelo contínuo (CANNON, 1967). As metodologias de identificação de oscilações selecionadas para esse trabalho, descritas nos itens seguintes, são utilizadas para a determinação dos valores de  $\lambda_z$  (modelo discreto) a partir do sinal de resposta. Como os sistemas de medição fasorial fornecem sinais analógicos discretizados no tempo, é preciso trabalhar com o modelo discreto, ou então, converter o valor de  $\lambda_z$  do modelo discreto para  $\lambda_s$  do modelo contínuo, utilizando a relação (3.4), onde  $T$  é o período da amostragem, que no caso dos SPMS MedFasee  $T = 1/60$ .

$$\lambda_{si} = \frac{1}{T} \ln(\lambda_{zi}) \quad (i = 1 \dots n) \quad (3.4)$$

As características das oscilações eletromecânicas são extraídas a partir dos valores  $\lambda$  utilizando as relações apresentadas na Tabela 3.1 (CANNON, 1967) (OGATA, 1995) (LIU *et al.*, 2007).

Tabela 3.1 – Características das oscilações.

Descrição	Contínuo	Discreto
Frequência ( $f$ )	$f_i = \frac{Im(\lambda_{si})}{2 \cdot \pi}$	$f_i = \frac{\Im \lambda_{zi}}{2 \cdot \pi \cdot T}$
Amortecimento ( $\xi$ )	$\xi_i = -\frac{\text{real}(\lambda_{si})}{ \lambda_{si} }$	$\xi_i = -\frac{\text{real}(\ln(\lambda_{zi}))}{ \ln(\lambda_{zi}) }$
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( $\Phi$ )	$\Phi_i = \text{ângulo }  R_i $	
Energia ( $E$ )	$E_i = \int e^{-\xi_i \cdot 2\pi \cdot f_i \cdot t} \cdot Am_i \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f_i \cdot t + \Phi_i)$	
$i = 1, \dots, n$ em que $n$ é a ordem do modelo. $k = 0, \dots, N - 1$ , em que $N$ é a quantidade de pontos do intervalo.		

Observando a Tabela 3.1, percebe-se a importância de se obter o valor dos resíduos ( $R_i, i = 1, \dots, n$ ). Para isso, é necessário entender o significado desse valor na resposta em frequência de um sinal. Note-se que o resíduo foi utilizado na definição da função de transferência em (3.2). Dessa forma, dado um sistema modelado por uma função de transferência (3.2), a resposta  $y(t)$  desse sistema a um impulso na entrada é dado por (3.5), em que se observa o resíduo como uma componente da resposta que modula a amplitude da componente  $i$  (LIU *et al.*, 2007).

$$y(t) = \sum_{i=1}^n e^{-\xi_i 2\pi f_i t} \cdot A m_i \cdot \text{sen}(2\pi f_i t + \Phi_i) = \sum_{i=1}^n R_i \cdot e^{\lambda_{si} \cdot t} \quad (3.5)$$

Para facilitar matematicamente a obtenção das características do modo, recomenda-se a utilização das equações do modelo discreto, que convertida para a forma matricial, é reescrita por (3.6) (LIU *et al.*, 2007).

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \dots & \lambda_n^{N-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

onde  $N$  é a quantidade de pontos do intervalo selecionado,  $n$  a ordem do modelo,  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) os polos do sistema ou autovalores da matriz  $A$  do modelo linear de espaço de estados e  $R_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) os resíduos associados aos polos.

A segurança do sistema elétrico pode ser analisada em termos do valor do amortecimento das oscilações eletromecânicas. Na Tabela 3.2 são apresentadas as faixas de valores para o amortecimento e o nível de segurança (LIU *et al.*, 2009).

Complementarmente, um modo de oscilação pode ser representado através das formas modais (*mode-shapes*) (KUNDUR, 1994 p. 714) (ZHOU *et al.*, 2009). As formas modais fornecem um indicativo de como a oscilação eletromecânica se manifesta em uma área específica do sistema. As formas modais fornecem informações relacionadas à amplitude e à fase de uma oscilação eletromecânica. Com essas informações, é possível definir quais áreas do sistema elétrico

oscilam contra outras. As formas modais são extraídas a partir da amplitude ( $Am$ ) e a fase ( $\Phi$ ) dos resíduos  $R_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ).

Tabela 3.2 – Níveis de segurança em relação ao amortecimento.

Amortecimento [%]	Nível de segurança
$\xi > 5$	Seguro
$2,5 < \xi \leq 5$	Atenção
$0 < \xi \leq 2,5$	Alerta, inseguro
$\xi \leq 0$	Alarme, instável

Para a oscilação eletromecânica representadas pela Figura 3.2, pode-se representar este modo através das formas modais da Figura 3.3. Nessa representação, tem-se a informação de que o sinal 2 (Azul) possui amplitude de 1,5 unidades e está defasado de  $180^\circ$  do sinal 1 que possui amplitude de 2 unidades.

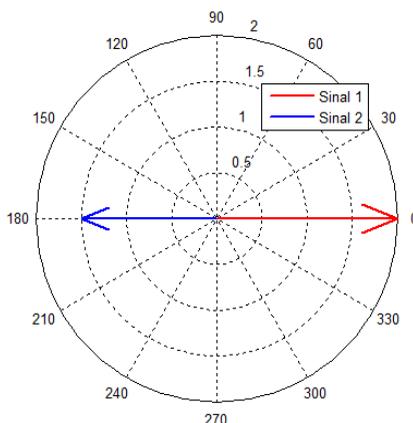


Figura 3.3 – Formas modais para representar o modo da Figura 3.2.

### 3.4 OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

No Sistema Interligado Nacional alguns modos de oscilações eletromecânicas são bastante conhecidos e os valores das frequências dessas oscilações variam dentro de uma faixa de acordo com a configuração do sistema e dos intercâmbios de potência entre as regiões.



possível estimar o comportamento dessa grandeza, utilizando os dados de defasagem angular.

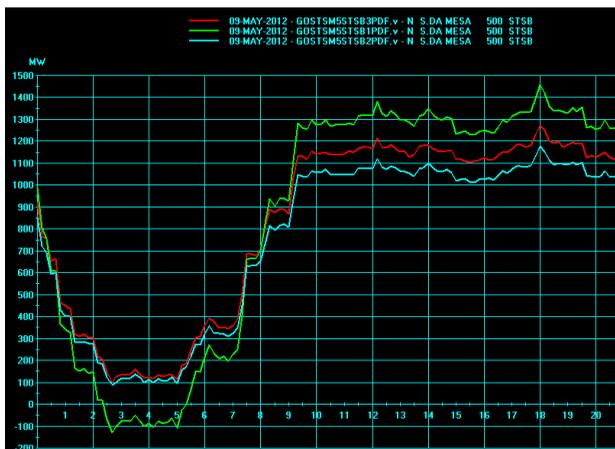


Figura 3.5 – Fluxo de potência ativa LT 500 kV Serra da Mesa – Samambaia (norte-sul).

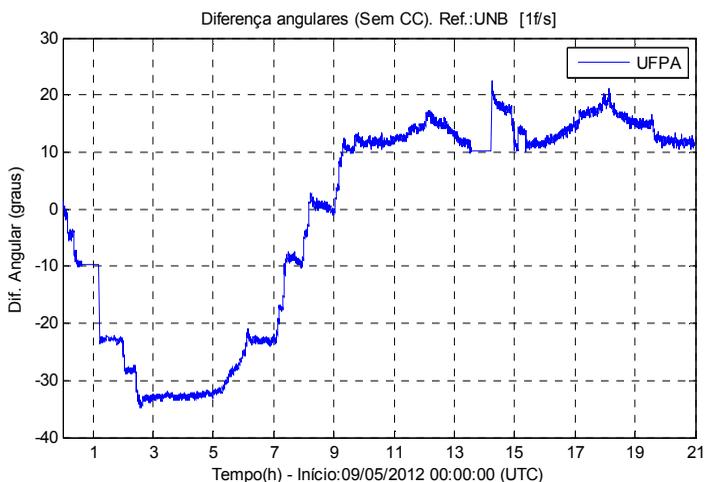


Figura 3.6 – Defasagem angular UNB (Brasília – DF) x UFPA (Belém – PA).

A Figura 3.5 e a Figura 3.6 demonstram que a forma do gráfico de fluxo de potência tem comportamento semelhante ao de diferença angular da tensão de sequência positiva. Nesse exemplo foi utilizado o fluxo de potência na LT 500kV Serra da Mesa – Samambaia (C1, C2 e

C3) que interliga as regiões sul/sudeste com norte/nordeste, e os valores da defasagem angular, entre os fasores de tensão de sequência positiva, monitoradas nas PMUs da Brasília – DF (UnB) e de Belém – PA (UFPA). Nota-se, pela semelhança entre as curvas, que por meio da defasagem angular da tensão de sequência positiva, tem-se noção dos aumentos ou reduções nos intercâmbios de potência entre aquelas áreas.

Esse tipo de informação é bastante útil na identificação de oscilações eletromecânicas a partir de dados ambientes no momento de validar os valores de amortecimentos encontrados (Seção 5.2.3).

### 3.5 MÉTODOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE OSCILAÇÕES ELÉTROMECÂNICAS

Os métodos para identificação de oscilações eletromecânicas são classificados em duas categorias: Métodos Paramétricos e Métodos não paramétricos.

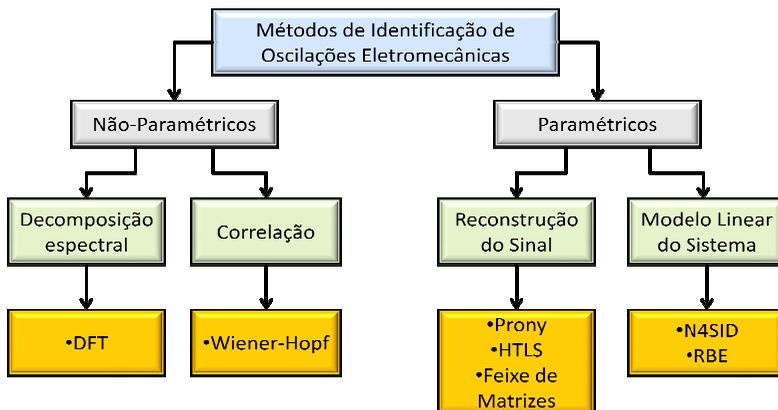


Figura 3.7 – Classificação dos métodos.

Nos métodos não paramétricos os modos de oscilação são obtidos de maneira indireta através de análises no domínio da frequência e são baseados na decomposição espectral e em técnicas de correlação de sinais. Neste trabalho são descritos os métodos não paramétricos da DFT (*Discrete Fourier Transform*) e Wiener-Hopf. Nos métodos paramétricos os modos são obtidos diretamente de um modelo e são analisados no domínio do tempo. Enquadram-se nesta categoria os

métodos baseados na reconstrução do sinal e na estimação do modelo linear do sistema. Neste trabalho são descritos os métodos de Prony, HTLS e Feixe de Matrizes, que estão baseados nas técnicas de reconstrução de sinal, e os métodos N4SID e Realização Balanceada Estocástica (RBE), que são métodos de subespaço baseados na estimação do modelo linear do sistema. Essas classificações são sintetizadas pela Figura 3.7.

Como apresentado na Seção 3.2, as oscilações eletromecânicas são monitoradas em condições de *ringdown* ou de dados ambiente. Cada um dos tipos de métodos deve ser aplicado em condições específicas, como será discutido na sequência.

Para compreender a aplicabilidade dos métodos, utiliza-se a analogia ao sistema massa-mola da Figura 3.8, que é modelado por equações dinâmicas, assim como o sistema elétrico (KIMBARK, 1948). A entrada deste sistema massa-mola é a força  $F1$  e a saída é a posição da massa em relação ao eixo  $y$ .

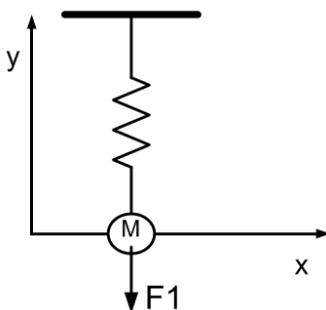


Figura 3.8 – Sistema massa-mola.

Suponha-se que o objetivo é determinar a frequência e a taxa de amortecimento que a massa experimenta devido a uma perturbação, neste caso uma força  $F1$ . Se  $F1$  for uma força de grande intensidade aplicada em um único instante, como um impulso, deixando a mola responder livremente, tem-se uma resposta da posição da mola em relação ao tempo representado na Figura 3.9 (a). Nesse caso, as características dinâmicas de interesse (frequência e amortecimento) são extraídas diretamente do sinal de resposta, semelhante a de uma grande perturbação no sistema elétrico. Dessa forma, as metodologias de reconstrução do sinal podem ser aplicadas para identificar as oscilações eletromecânicas em *ringdown*.

A segunda análise é feita quando a força  $F1$  é aplicada continuamente, ou seja, a entrada do sistema possui características de um ruído. A resposta do sistema para este caso é semelhante àquela apresentada na Figura 3.9 (b). Considerando que a mola é a mesma do caso anterior, o amortecimento por ela imposto é o mesmo. No entanto, se forem utilizados métodos baseados na reconstrução do sinal, ter-se-á a falsa impressão de que o amortecimento é nulo ou até mesmo negativo. Por isso, é necessário utilizar metodologias baseadas na estimação do modelo do sistema, correlação ou decomposição espectral.

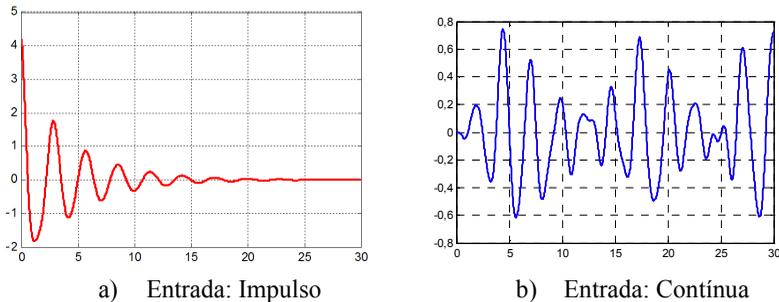


Figura 3.9 – Resposta do sistema massa-mola.

Na sequência deste trabalho, são descritos matematicamente os métodos para detecção de oscilações eletromecânicas. São destacadas as principais dificuldades encontradas ao aplicar estes métodos em dados reais, tais como a definição dos parâmetros (ordem do modelo, dimensão das matrizes de entrada, janela de tempo, taxa de amostragem, entre outros). No capítulo 4, são discutidos ajustes para estes parâmetros de forma a facilitar a utilização das metodologias. Exemplos numéricos da aplicação dos métodos para *ringdown* são apresentados no “APENDICE C – Aplicação Numérica dos Métodos para Ringdown”.

Foram selecionados para este trabalho os métodos da DFT, Wiener-Hopf, Prony, HTLS, Feixe de Matrizes (*Matrix Pencil*), N4SID e Realização Balanceada Estocástica. A opção por estes métodos foi feita com base nas revisões bibliográficas relacionadas ao tema, destacando-se os autores conhecidos e consagrados na literatura, como os trabalhos de Sarkar *et al.* (1995), Pierre *et al.* (1997), Trudnowski *et al.* (1999 e 2008), Katayama (2005) e Liu *et al.* (2007). Além destes trabalhos, complementam-se estudos já desenvolvidos no âmbito do projeto MedFasee como os trabalhos de Santos (2008) e Prioste (2011).

### 3.6 MÉTODOS BASEADOS NA DECOMPOSIÇÃO ESPECTRAL E NA CORRELAÇÃO

#### 3.6.1 Transformada Discreta de Fourier

A Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* – DFT) é uma das técnicas mais simples e robusta para a identificação de componentes de frequência contidas em um sinal, baseada na decomposição espectral.

A DFT consiste basicamente em decompor um sinal  $Y$  como o somatório de funções seno e cosseno com amplitudes ( $x$ ) e frequência  $f = 2\pi ik/N$ , conforme (3.7) (LATHI, 2004) (LIONS, 2004).

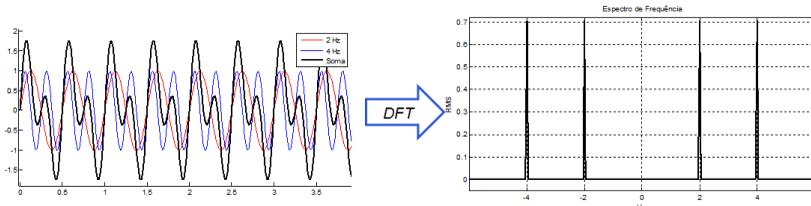
$$Y(i) = \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \cdot \left[ \cos\left(\frac{2\pi ik}{N}\right) - j \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi ik}{N}\right) \right] \quad (3.7)$$

onde  $Y(k)$  é a  $k$ -ésima componente de saída da DFT,  $i$  é o índice da componente de saída no domínio da frequência ( $i = 0, 1, \dots, N - 1$ ),  $y(i)$  são os dados amostrados de entrada,  $i$  é o índice do sinal de entrada no domínio do tempo ( $k = 0, 1, \dots, N - 1$ ),  $j = \sqrt{-1}$ ,  $N$  é o número de amostras do sinal de entrada e de pontos de saída da DFT.

Quando a DFT é aplicada em um sinal proveniente de SPMS, as componentes deste sinal, que são consequências de oscilações eletromecânicas, aparecem destacadas no espectro de frequências. Para o cálculo da DFT existem os algoritmos denominados *Fast Fourier Transform* – FFT (LIONS, 2004) que são técnicas de programação que facilitam o cálculo da DFT.

A principal desvantagem da DFT é não fornecer valores de amortecimento e fase. Contudo, a DFT pode ser aplicada tanto em dados de *ringdown* quanto em dados ambiente.

Para exemplificar a aplicação do método da DFT, considera-se o seguinte caso: o sinal (preto), mostrado na Figura 3.10(a) resultante da composição de um sinal (vermelho) de frequência 2 Hz e amplitude 1,4 rms, com um sinal (azul) de frequência 4 Hz e amplitude de 1,4 rms. Aplicando-se a DFT neste sinal, tem-se o espectro de frequências da Figura 3.10(b). Nesse caso, percebem-se as componentes em  $\pm 2$  Hz e  $\pm 4$  Hz com 50% da amplitude cada.



a) Sinal de entrada

b) Espectro de frequência

Figura 3.10 – Aplicação da DFT

Com base nesta análise, constata-se que a DFT fornece informações prévias de grande valia sobre as componentes de frequência contidas em um sinal. A principal desvantagem é que a DFT não fornece o valor do amortecimento.

### 3.6.2 Método Wiener-Hopf

O método Wiener-Hopf (PIERRE *et al.*, 1997) é baseado nos conceitos de Filtros Branqueadores (*Whitening Filter*) ou Filtros FIR (*Finite Impulse Response*) que consistem em remover o ruído de um sinal por técnicas de correlação (CHEN *et al.*, 2006).

Observe-se o modelo apresentado na Figura 3.11 em que  $G(z)$  representa as equações que modelam o sistema. O sinal de entrada do sistema para dados ambiente pode ser modelado por um ruído que representa a variação aleatória da carga (VANFRETTI *et al.*, 2011) (HAUER *et al.*, 1991). A variável  $y(t)$  representa o sinal medido pelas PMUs. O filtro FIR,  $W(z)$ , de alta ordem, é utilizado para “branquear” um sinal, ou seja, transformá-lo novamente em um ruído branco.

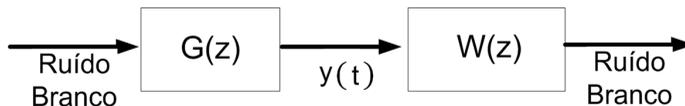


Figura 3.11 – Modelo de função de transferência com filtro Wiener.

Nesse caso, tem-se que:

$$G(z) = \frac{N(z)}{D(z)} \quad (3.8)$$

e:

$$W(z) = 1 + w_1 z^{-1} + w_2 z^{-2} + \dots + w_n z^{-n} \quad (3.9)$$

Para que se tenha um ruído branco na saída do sistema representado na Figura 3.11 é preciso que os zeros de  $W(z)$  cancelem os polos de  $G(z)$ . Com isso, o método Wiener-Hopf consiste em determinar os valores dos coeficientes de  $W(z)$  no qual os zeros coincidirão com os polos do sistema.

Portanto, é necessário encontrar os coeficientes  $w_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) do filtro FIR, utilizando funções de autocorrelação,  $\hat{r}(k)$ , do sinal  $y(t)$ , através de (3.10), criando assim o vetor  $\hat{r}$  (3.11) de correlação.

$$\hat{r}(k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=k}^{N-1} y(i)y(i-k), \quad k = 0, 1 \dots n \quad (3.10)$$

$$\hat{r} = [\hat{r}(1) \quad \hat{r}(2) \quad \dots \quad \hat{r}(n)]^T \quad (3.11)$$

onde  $y$  é o sinal medido,  $n$  é a ordem do modelo,  $k$  é o índice dos sinais discretizados no tempo e  $N$  é a quantidade de dados no intervalo de interesse.

Para aplicar esta metodologia é necessário que o usuário forneça a ordem ( $n$ ) do FIR. Os valores de  $n$  adequados para aplicação em dados fasoriais são apresentados no capítulo 4.

Após construir o vetor de correlação, é possível montar a matriz de autocorrelação  $\hat{R}$  dada por (3.12).

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} \hat{r}(0) & \hat{r}(1) & \dots & \hat{r}(n-1) \\ \hat{r}(1) & \hat{r}(0) & \dots & \hat{r}(n-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{r}(n-1) & \hat{r}(n-2) & \dots & \hat{r}(0) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Para encontrar os coeficientes  $w_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), soluciona-se a equação (3.13) de Wiener-Hopf (SHYNK *et al.*, 1992).

$$\hat{R}\tilde{w} = \hat{r} \quad (3.13)$$

onde:

$$w = [1 \quad -\tilde{w}] \quad (3.14)$$

Os valores dos polos  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) do modelo do sistema são dados pelas raízes do polinômio  $W(z)$  em (3.9), e as características das oscilações são obtidas utilizando as relações da Tabela 3.1.

Para aplicar o método Wiener-Hopf, pode-se utilizar o algoritmo apresentado na sequência.

### Algoritmo para o método Wiener-Hopf

- 1) Definir a ordem  $n$  do filtro FIR de (3.9).
- 2) Criar o vetor de autocorrelação  $\hat{r}$  conforme (3.10) e (3.11) e a matriz de autocorrelação  $\hat{R}_{n \times n}$  utilizando (3.12).
- 3) Resolver a equação de Wiener-Hopf (3.13) para obter os coeficientes  $w_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) do filtro FIR.
- 4) Encontrar as raízes de  $W(z)$  em (3.9), para obtenção dos valores de  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ).
- 5) Encontrar as demais características dos modos utilizando as fórmulas da Tabela 3.1.

## 3.7 MÉTODOS BASEADOS NA RECONSTRUÇÃO DO SINAL

Durante o período transitório (*ringdown*), a dinâmica do sistema elétrico fica mais evidenciada. Dessa forma, a maneira mais fácil de identificar as características de um modo de oscilação é através da análise da resposta do sistema elétrico a uma grande perturbação. A energia e amplitude das oscilações durante o *ringdown* e o aumento da relação sinal ruído permite que os métodos paramétricos, baseados na reconstrução do sinal, forneçam bons resultados na estimativa dos modos de oscilações de potência, como é o caso dos métodos de Prony, HTLS e Feixe de Matrizes.

Retomando alguns conceitos apresentados neste trabalho, o sinal da resposta transitória do sistema elétrico a uma grande perturbação pode ser reconstruído pela equação (3.15) (LIU *et al.*, 2007).

$$y(t) = \sum_{i=1}^n e^{-\xi_i 2\pi f_i t} \cdot Am_i \cdot \text{sen}(2\pi f_i t + \Phi_i) = \sum_{i=1}^n R_i \cdot e^{\lambda_{si} t} \quad (3.15)$$

Em que:

$n$  = é a ordem do modelo.

$i$  = índice dos modos identificados ( $i = 1, \dots, n$ )

$R_i$  = Resíduos do modelo do sistema

$\lambda_i$  = autovalores do sistema associados ao modo de oscilação  $i$ .

$Am_i$  = Amplitude do modo de oscilação  $i$ .

$f_i$  = Frequência do modo de oscilação  $i$ .

$\xi_i$  = Coeficiente de amortecimento do modo de oscilação  $i$ .

$\phi_i$  = Fase do modo de oscilação  $i$ .

Para a obtenção dos coeficientes  $Am_i$ ,  $f_i$ ,  $\xi_i$  e  $\phi_i$  utilizam-se os polos da função de transferência, ou os autovalores da equação de espaço de estados (Seção 3.3.1). Dessa forma, a descrição dos métodos é feita até o ponto em que são obtidos os valores de  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), pois as demais características dos modos, como frequência, amortecimento, amplitude, fase e energia são similares a todas as metodologias e podem ser extraídas dos valores de  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) apresentado na Tabela 3.1.

### 3.7.1 Método de Prony

O Método de Prony foi desenvolvido pelo francês Gaspard Clair François Marie Riche de Prony (1755-1839) e trata-se de um dos métodos mais tradicionais para análise de oscilações eletromecânicas.

Encontram-se na literatura diversos trabalhos descrevendo matematicamente o método de Prony, entre eles Santos (2008), Hauer *et al.* (1990), Liu *et al.* (2007) e Trudnowski (1999). No entanto, para este trabalho será utilizada a notação com base na descrição feita no trabalho de Liu *et al.* (2007).

Como o objetivo principal é aplicar este método em dados reais de um sistema de medição fasorial, é preciso utilizar os modelos no domínio discretos dos sistemas. Assim, reescreve-se a equação (3.15) que decompõe o sinal medido como sendo produto entre os polos  $\lambda_i$  e resíduos  $R_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), por (3.16).

$$y(k) = \sum_{i=1}^n R_i \lambda_i^k \quad k = 0, \dots, N - 1 \quad (3.16)$$

em que  $n$  é a ordem do modelo e  $N$  é o total de pontos do intervalo em análise

A equação (3.16) pode ser reescrita na forma matricial como (3.17). É importante ressaltar que esta equação será utilizada para todos os métodos apresentados neste trabalho.

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \cdots & \lambda_n^{N-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

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 modelado pela função de transferência (3.18).

$$G(z) = \frac{N(z)}{z^n - (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \cdots + a_n z^0)} \quad (3.18)$$

Os polos da função de transferência são determinados pela equação (3.19).

$$z^n - (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \cdots + a_n z^0) = 0 \quad (3.19)$$

Deve-se observar em (3.19) que não são conhecidos os coeficientes  $a$ . Para determiná-los, multiplica-se a equação (3.17) pelo vetor  $[-a_n \ -a_{n-1} \ \cdots \ -a_1 \ 1 \ 0 \ \cdots \ 0]$  e obtém-se a relação (3.20). O lado direito desta igualdade é zero devido ao requisito (3.19) para determinação dos polos.

$$[-a_n \ -a_{n-1} \ \cdots \ -a_1 \ 1 \ 0 \ \cdots \ 0] \cdot \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.20)$$

A mesma igualdade de (3.20) ocorrerá quando a multiplicação for feita com os vetores:

$$[0 \ -a_n \ -a_{n-1} \ \cdots \ -a_1 \ 1 \ 0 \ \cdots \ 0]$$

$$[0 \ 0 \ -a_n \ -a_{n-1} \ \cdots \ 1 \ 0 \ \cdots \ 0]$$

Dessa forma, fazendo estas multiplicações sucessivas vezes até o vetor  $[0 \ 0 \ \dots \ -a_n \ -a_{n-1} \ 1]$ , é possível reescrever essas igualdades utilizando (3.21) e encontrar os valores dos coeficientes  $a$ .

$$\begin{bmatrix} y(n) \\ y(n+1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(n-1) & y(n-2) & \dots & y(0) \\ y(n) & y(n-1) & \dots & y(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-2) & y(N-3) & \dots & y(N-n-1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Conhecidos os coeficientes  $a_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), os valores dos polos  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) são encontrados a partir de (3.19) e os valores de frequência, amortecimento, amplitude e fase são obtidos a partir dos polos, utilizando a metodologia apresentada na Tabela 3.1.

### ***Método de Prony Multissinais***

O método de Prony pode ser aplicado para o processamento simultâneo de múltiplos sinais, através do método chamado de Prony Multissinais (TRUDNOWKI *et al.*, 1999), o que permite a identificação de modos de oscilações comuns aos vários sinais escolhidos. Esse procedimento é bastante importante em estudos de oscilações eletromecânicas, pois permite analisar como um modo de oscilação se manifesta em diferentes regiões, através do esboço das formas modais (*mode-shapes*) que permitem identificar quais áreas oscilam entre si.

Para utilizar o método de Prony multissinais, em que  $m$  é a quantidade de sinais, a equação (3.17) utilizada no cálculo dos resíduos precisa ser adaptada para (3.22).

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} y_1(0) & y_2(0) & \dots & y_m(0) \\ y_1(1) & y_2(1) & \dots & y_m(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_1(N-1) & y_2(N-1) & \dots & y_m(N-1) \end{bmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_n^{N-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1^{(1)} & R_1^{(2)} & \dots & R_1^{(m)} \\ R_2^{(1)} & R_2^{(2)} & \dots & R_2^{(m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_n^{(1)} & R_n^{(2)} & \dots & R_n^{(m)} \end{bmatrix} \quad (3.22) \end{aligned}$$

A obtenção dos coeficientes  $a_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) é feita empilhando as matrizes de dados  $y$  da equação (3.21) e solucionando a equação (3.23) por mínimos quadrados. Em seguida, soluciona-se (3.19) para a

obtenção dos valores  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) e, por fim, os resíduos utilizando (3.22).

Observe-se que na matriz dos resíduos (3.22), o sobrescrito entre parênteses é apenas um índice referente ao sinal ( $1, \dots, m$ ) (e não elevado à potência) e o subscrito refere-se ao modo encontrado ( $1, \dots, n$ ), enquanto que na matriz de  $z$  de (3.22) os sobrescritos indicam elevação à potência ( $0, \dots, N - 1$ ).

$$\begin{bmatrix} y_1(n) \\ y_1(n+1) \\ \vdots \\ y_1(N-1) \\ [\vdots] \\ y_m(n) \\ y_m(n+1) \\ \vdots \\ y_m(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(n-1) & y_1(n-2) & \cdots & y_1(0) \\ y_1(n) & y_1(n-1) & \cdots & y_1(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_1(N-2) & y_1(N-3) & \cdots & y_1(N-n-1) \\ [\vdots] & [\vdots] & [\ddots] & [\vdots] \\ y_m(n-1) & y_m(n-2) & \cdots & y_m(0) \\ y_m(n) & y_m(n-1) & \cdots & y_m(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_m(N-2) & y_m(N-3) & \cdots & y_m(N-n-1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Analisando a equação (3.23), percebe-se que são identificados  $n$  coeficientes  $a$ , e pela equação (3.19) são determinados  $n$  modos de oscilações. Para cada um dos  $n$  modos são determinados  $m$  resíduos, isso significa que a amplitude e a fase das  $n$  oscilações se manifestarão de forma diferente em cada um dos  $m$  sinais.

Observe-se que no método de Prony é preciso definir a ordem  $n$  do modelo e escolher uma janela adequada com  $N$  pontos. O método é bastante sensível a essas escolhas. No capítulo 4 são propostos valores para  $n$  e  $N$ , de forma a viabilizar em identificação de oscilações eletromecânicas, utilizando sincrofasores de um sistema real de monitoração.

Para a aplicação do método de Prony, deve-se utilizar o algoritmo seguinte.

### Algoritmo para o método de Prony

- 1) Definir a ordem  $n$  do modelo;
- 2) Determinar os coeficientes  $a_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) por (3.21) (monossinal) ou (3.23) (multissinal);
- 3) Calcular os valores de  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) solucionando (3.19);
- 4) Calcular os valores dos Resíduos por (3.17) (monossinal) ou (3.22) (multissinal);
- 5) Encontrar as demais características dos modos pelas equações da Tabela 3.1.

### 3.7.2 Método HTLS – *Hankel Total Least Square*

A Matriz de Hankel  $H$  é uma matriz quadrada e simétrica tal que, para todo elemento  $a_{i,j} \in H \rightarrow a_{i,j} = a_{i-1,j+1}$  (PARTIGNTON, 1988). A montagem de uma matriz de Hankel ( $H$ ) para um vetor  $y$  que contém  $N$  medidas fasoriais, por exemplo, pode ser feita por (3.24).

$$H = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & y_2 & \cdots & y_{M-1} \\ y_1 & y_2 & y_3 & \cdots & y_M \\ y_2 & y_3 & y_4 & \cdots & y_{M+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{L-1} & y_L & y_{L+1} & \cdots & y_{N-1} \end{bmatrix}_{L \times M} \quad (3.24)$$

onde  $M$  é o número de colunas e  $L$  o número de linhas desta matriz que precisam ser pré-definidas. Considerando-se que o vetor  $y$  é limitado e possui  $N$  elementos, então os parâmetros  $L$  e  $M$  precisam ser escolhidos levando em consideração a quantidade de dados, de forma a assegurar  $M = L$ . Para isto,  $M = L = (N + 1)/2$ , esta escolha é melhor definida na Seção 4.7.

É possível modelar o sinal  $y$  monitorado através de (3.25) que o relaciona com os polos e resíduos do modelo do sistema.

$$y(k) = \sum_{i=1}^n R_i \lambda_i^k \quad k = 0 \dots N - 1 \quad (3.25)$$

em que  $n$  é a ordem do modelo,  $R_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) são os resíduos e  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) os polos da função de transferência que modela o sistema.

Com base em (3.25), afirma-se que a matriz de Hankel ( $H$ ), com os dados medidos, pode ser decomposta em matrizes  $S$ ,  $R$  e  $T^T$  conforme (3.26).

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1^1 & z_2^1 & \cdots & z_n^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^L & z_2^L & \cdots & z_n^L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1 & & & \\ & R_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & R_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & z_1^1 & \cdots & z_1^{M-1} \\ 1 & z_2^1 & \cdots & z_2^{M-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & z_n^1 & \cdots & z_n^{M-1} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$H = SRT^T$$

Definindo uma matriz  $Z$  de dimensão  $n \times n$  que contém na diagonal os valores de  $\lambda_1 \cdots \lambda_n$ , pode-se demonstrar que a igualdade (3.27) é satisfeita. O símbolo ( $\downarrow$ ) indica que a matriz foi deslocada para baixo e a última linha da matriz foi removida e ( $\uparrow$ ) indica que a matriz sofreu um deslocamento para cima e a primeira linha foi eliminada.

$$S_{\downarrow}Z = S_{\uparrow} \quad (3.27)$$

Para determinar as matrizes  $S$  e  $T$  de (3.26), utiliza-se a Decomposição em Valores Singulares – SVD (CHEN, 1999, p.76) para obter a relação apresentada em (3.28). Nesta notação, o índice (\*) da matriz  $V$  denota o complexo conjugado transposto.

$$H = [\hat{U} \quad U_0] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\Sigma} & 0 \\ 0 & \Sigma_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V} \\ V_0 \end{bmatrix}^* \quad (3.28)$$

Os valores singulares estão na diagonal da matriz  $\Sigma$ . Deve-se saber que ao se determinar a SVD, os valores singulares estarão ordenados na diagonal de maneira decrescente.  $\hat{\Sigma}$  é uma submatriz contendo os  $n$  maiores valores singulares. Se as medidas  $y$  forem livres de ruídos  $\Sigma_0$  será nulo. Porém, na presença de ruídos,  $\Sigma_0$  será uma matriz cheia, mas com valores singulares de baixo valor relativo. Dessa forma, deve-se estabelecer uma tolerância para que sejam considerados apenas os valores singulares mais significativos e o ruído seja significativamente atenuado. Uma forma de fazer isso é normalizar-se o vetor de valores singulares, dividindo todos os valores pelo maior deles, no caso ( $\Sigma_{1,1}$ ).

Na sequência do método devem-se considerar apenas os valores singulares cujo valor normalizado é maior que uma determinada tolerância. Assim, a quantidade de valores singulares que atingem a tolerância estipulada definirá a ordem  $n$  do modelo. Essa definição, apresentada por Liu *et al.* (2007), é descrita por (3.29).

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} > 10^{-p} \quad , c = 1, \dots, \min(M, L) \quad (3.29)$$

Por consequência, como são considerados apenas as  $n$  linhas e colunas de  $\Sigma$ , devem-se considerar apenas as  $n$  primeiras colunas de  $U$ , e as  $n$  primeiras linhas de  $V$ . Com isso,  $H$  é redefinido por (3.30).

$$H = \widehat{U}\widehat{\Sigma}\widehat{V}^* \quad (3.30)$$

Comparando (3.30) com (3.26), obtém-se a relação (3.31).

$$\widehat{U} = SQ \quad (3.31)$$

em que  $Q$  é uma matriz não singular  $n \times n$ . Excluindo a primeira linha desse sistema linear, tem-se que  $\widehat{U}_\uparrow = S_\uparrow Q$ , e se for excluída a última linha, tem-se que  $\widehat{U}_\downarrow = S_\downarrow Q$ . A partir de (3.27), que define  $S_\downarrow Z = S_\uparrow$ , obtém-se a relação (3.32).

$$\begin{aligned} \widehat{U}_\uparrow = S_\downarrow Z Q &= \widehat{U}_\downarrow Q^{-1} Z Q = \widehat{U}_\downarrow \tilde{Z} \\ \widehat{U}_\uparrow &= \widehat{U}_\downarrow \tilde{Z} \end{aligned} \quad (3.32)$$

De acordo com a descrição utilizada, Liu *et al.* (2007),  $\tilde{Z} = Q^{-1} Z Q$  possui os mesmos polos de  $Z$ , ou seja,  $\lambda_1 \cdots \lambda_n$ . Desta forma, o método HTLS obtém os valores de  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) para que sejam extraídas as informações dos modos de oscilações presentes no sinal  $y$ .

### ***Método HTLS Multissinais***

O Método HTLS também permite que sejam processados múltiplos sinais simultaneamente. Para isso, basta que as matrizes de Hankel de cada um dos sinais sejam colocadas lado a lado, como mostrado em (3.33), em que  $m$  é o número de sinais desejados.

$$H_{multissinais} = [H_1 \quad H_2 \quad \cdots \quad H_m] \quad (3.33)$$

Para calcular a frequência e o amortecimento a partir dos valores  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), utilizam-se as técnicas mostradas na Tabela 3.1.

Para a aplicação do método HTLS, pode-se utilizar a algoritmo apresentado na sequência.

#### **Algoritmo para o método de HTLS**

- 1) Montar a matriz de Hankel ( $H$ ) com dimensão  $L \times M$  definida pelo usuário em que  $M = N + 1 - L$ , conforme (3.24) (monossinal) ou (3.33) (multissinal);
- 2) Decompor a matriz  $H$  em valores singulares como (3.28);
- 3) Definir a ordem  $n$ , com a tolerância para os valores

- singulares mais significativos como (3.29);
- 4) Utilizar a matriz decomposta  $\tilde{U}$  em (3.30), para solucionar a equação (3.32), e obter os valores de  $\lambda$ ;
  - 6) Calcular os valores dos Resíduos por (3.17) (monossinal) ou (3.22) (multissinal), conforme método de Prony;
  - 5) Encontrar as demais características dos modos pelas equações da Tabela 3.1.

### 3.7.3 Método Feixe de Matrizes (*Matrix Pencil*)

O termo em inglês *Matrix Pencil* é referido no Brasil de diferentes formas, como Feixe de Matrizes, Matriz Polinomial,  $\lambda$ -Matriz ou então simplesmente como Matriz Pencil. Para este trabalho será utilizado o nomenclatura Feixe de Matrizes.

Por definição, se  $A_0, A_1, \dots, A_l$  são matrizes complexas  $n \times n$  e  $l$  um valor não negativo, então o Feixe de Matrizes de grau  $l$  é definida pela equação (3.34) (MARCUS, 1969).

$$L(\lambda) = \sum_{i=0}^l \lambda^i \cdot A_i \quad (3.34)$$

Um caso especial é quando  $l = 1$ , em que o Feixe de Matrizes possuirá a forma  $A + \lambda B$ , e é dito linear (IKRAMOV, 2005). Utilizando este conceito, foi criado um método para a identificação de oscilações em sinais. Este método foi descrito por Sarkar *et al.* (1995) e posteriormente abordado por Liu *et al.* (2007), com aplicações que utilizam sincrofasores.

A descrição apresentada neste trabalho baseia-se em Sarkar *et al.* (1995). Inicialmente, é necessário construir a matriz de Hankel com os  $N$  dados de entrada, definindo o parâmetro *Pencil* ( $M$ ) desta matriz, conforme (3.35). Nota-se por (3.35) que  $M$  é uma unidade maior que o número de colunas. Sarkar *et al.* (1995) utilizam a notação  $L$ , no entanto neste trabalho será utilizado  $M$ , visto que  $M$  está relacionado às colunas e  $L$  às linhas.

$$Y = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \cdots & y(M) \\ y(1) & y(2) & \cdots & y(M+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-M-1) & y(N-M) & \cdots & y(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

De maneira análoga ao Método HTLS, faz-se a decomposição em valores singulares da matriz  $Y$ , de forma a definir a ordem  $n$  do modelo. A ordem será determinada pela quantidade de valores singulares no qual a relação com o máximo autovalor seja maior que uma dada tolerância, como apresentado em (3.29) do método HTLS.

Dessa forma, tem-se a relação (3.36) em que o índice ( $\wedge$ ) indica a dimensão  $n$  dos valores singulares mais significativos, e o índice (0) dos valores singulares que serão desprezados.

$$Y = [\hat{U} \quad U_0] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\Sigma} & 0 \\ 0 & \Sigma_0 \end{bmatrix} \cdot [\hat{V}]^* \quad (3.36)$$

Contudo, redefine-se a matriz  $Y$  por (3.37) em que são considerados apenas os  $n$  maiores valores singulares que atingem a tolerância (3.29).

$$\hat{Y} = \hat{U} \hat{\Sigma} \hat{V} \quad (3.37)$$

Eliminando a última coluna de  $\hat{Y}$ , tem-se a matriz  $Y_1$  em (3.38) e eliminado a primeira coluna da  $\hat{Y}$ , tem-se a matriz  $Y_2$  em (3.39).

$$Y_1 = \hat{Y} \rightarrow = \begin{bmatrix} \hat{y}(0) & \hat{y}(1) & \cdots & \hat{y}(M-1) \\ \hat{y}(1) & \hat{y}(2) & \cdots & \hat{y}(M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{y}(N-M-1) & \hat{y}(N-M) & \cdots & \hat{y}(N-2) \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$Y_2 = \hat{Y} \leftarrow = \begin{bmatrix} \hat{y}(1) & \hat{y}(2) & \cdots & \hat{y}(M) \\ \hat{y}(2) & \hat{y}(3) & \cdots & \hat{y}(M+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{y}(N-M) & \hat{y}(N-M+1) & \cdots & \hat{y}(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Definem-se também outras quatro matrizes,  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_0$  e  $R$ .

$$Z_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^{N-M-1} & \lambda_2^{N-M-1} & \cdots & \lambda_n^{N-M-1} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$Z_2 = \begin{bmatrix} 1 & \lambda_1 & \cdots & \lambda_1^{M-1} \\ 1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_2^{M-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \lambda_n & \cdots & \lambda_n^{M-1} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$Z_0 = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n] \quad (3.42)$$

$$R = \text{diag}[R_1, R_2 \dots R_n] \quad (3.43)$$

Sabe-se que um sinal pode ser modelado pelo somatório do produto entre polos e resíduos dado por (3.44).

$$y(k) = \sum_{i=1}^n R_i \lambda_i^k \quad k = 0 \dots N - 1 \quad (3.44)$$

Observe-se que utilizando as definições de (3.38) a (3.43), é possível demonstrar que as igualdades (3.45) e (3.46) são satisfeitas.

$$Y_1 = Z_1 \cdot R \cdot Z_2 \quad (3.45)$$

$$Y_2 = Z_1 \cdot R \cdot Z_0 \cdot Z_2 \quad (3.46)$$

Considerando o Feixe de Matrizes formado com  $Y_1$  e  $Y_2$ , tem-se a equação (3.47).

$$Y_2 - \lambda Y_1 = Z_1 R (Z_0 - \lambda I) Z_2 \quad (3.47)$$

O *rank* (CHEN, 1999) da matriz (3.47) é igual a  $n$ , para  $\lambda = \lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) o termo entre parênteses será igual a zero e o *rank* será igual a  $n - 1$ . Dessa forma, os valores de  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) são encontrados como sendo os autovalores generalizados do par  $(Y_2; Y_1)$  que equivale ao apresentado na equação (3.48), em que  $(\dagger)$  representa a pseudoinversa da matriz (SARKAR *et al.*, 1995).

$$\lambda = \text{autovalores}(Y_1^\dagger \cdot Y_2) \quad (3.48)$$

O método Feixe de Matrizes, como apresentado por Sarkar *et al.* (1995), não permite a aplicação em múltiplos sinais simultaneamente e conseqüentemente não é possível o esboço das formas modais.

Para a aplicação do método Feixe de Matrizes, pode-se utilizar o algoritmo seguinte.

#### **Algoritmo para o método Feixe de Matrizes**

- 1) Montar a matriz de Hankel  $Y$ , com número de colunas  $M + 1$  definido pelo usuário, (3.35);
- 2) Decompor a matriz  $Y$  em valores singulares (3.36) e definir a ordem  $n$  do modelo;
- 3) Construir a matriz  $\hat{Y}$ , com a tolerância estipulada para os valores singulares, (3.29) e (3.37);
- 4) Construir as matrizes  $Y_1$  e  $Y_2$  a partir de  $\hat{Y}$ , (3.38) e (3.39);
- 5) Determinar os valores de  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) por (3.48);
- 7) Calcular os valores dos Resíduos por (3.17) conforme método de Prony;
- 6) Encontrar as demais características dos modos pelas equações da Tabela 3.1.

### **3.8 MÉTODOS BASEADOS NA ESTIMAÇÃO DO MODELO LINEAR DO SISTEMA**

Nesta seção, descrevem-se os métodos N4SID (KATAYAMA, 2005) e Realização Balanceada Estocástica – RBE (KATAYAMA, 2005) que são métodos de subespaço de estados. São apresentados os conceitos gerais dos métodos baseados na estimação do modelo linear do sistema (métodos de subespaço de estados), a descrição matemática e destacados os parâmetros que precisam ser ajustados para a adequada utilização desses métodos em dados de sincrofasores.

#### **3.8.1 Métodos de subespaço de estados**

Para introdução do conceito de estimação do modelo linear do sistema, pode-se modelar o sistema dinâmico por equações algébrico-diferenciais conforme (3.49) (STOTT, 1979 p.221).

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= f(x, z, u) \\
 z &= g(x, z, u) \\
 y &= h(x, z, u)
 \end{aligned}
 \tag{3.49}$$

onde  $x \in R^n$ ,  $z \in R^l$  e  $y \in R^m$  são vetores das variáveis de estado, de variáveis algébricas e de entradas e saídas.  $n$  é a ordem do modelo,  $l$  é a quantidade de sinais de entrada e  $m$  a quantidade de sinais de saída. Essas equações podem ser linearizadas em um ponto de equilíbrio  $\{z_0, x_0, u_0\}$  e assim obtidas as equações diferenciais ordinárias modeladas na forma de equações de espaço de estados, definido por (3.50) (VANFRETTI *et al.*, 2011).

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= A \cdot x(t) + B_E \cdot u_E(t) + B_L \cdot q(t) \\
 y(t) &= C \cdot x(t) + D_E \cdot u_E(t) + D_L \cdot q(t) + \mu(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.50}$$

em que  $A_{n \times n}$  é a matriz de estados,  $B_{n \times m}$  é a matriz de entradas,  $C_{l \times n}$  é a matriz de saídas e  $D_{l \times m}$  a matriz de transmissão direta. Onde  $n$  é a ordem do modelo,  $m$  é a quantidade de sinais de saída e  $l$  a quantidade de sinais de entrada.  $x$  é o vetor de estados,  $y$  são as medidas contaminadas com ruídos de medição  $\mu$  causados pelos equipamentos de instrumentação, canais de comunicação, entre outros.  $u_E$  é o vetor de entradas conhecidas injetadas no sistema (sinal de sondagem) e  $q$  é um vetor aleatório de baixa amplitude que modela um ruído de entrada produzido pela variação de carga. Observa-se por essa equação que as matrizes  $B$  e  $D$  estão separadas em uma parte associada a entrada  $u_E$  e outra associada a entrada  $q$ .

De acordo com o Capítulo 3, para a análise de oscilações eletromecânicas, utilizando as equações de espaço de estados, é necessária apenas a matriz  $A_{n \times n}$ , pois as características de um modo de oscilação são extraídas dos autovalores ( $\lambda_i, i = 1, \dots, n$ ) da matriz  $A_{n \times n}$ . Assim sendo, utilizam-se os métodos para a estimação do modelo linear do sistema elétrico até o ponto em que se determina essa matriz, não sendo necessária a identificação das matrizes  $B, C$  e  $D$ .

Partindo-se de um modelo determinístico, em que o vetor de entradas  $u_E$  é conhecido e  $q(t)$  é nulo a equação (3.50) é convertida para o modelo discreto em (3.51).

Para encontrar a matriz  $A$  é preciso encontrar uma relação direta entre os vetores  $u$  e  $y$  com a matriz  $A$ .



$$U_{0|L-1} = \begin{bmatrix} u_1[0] & u_1[1] & \cdots & u_1[M-1] \\ u_2[0] & u_2[1] & \cdots & u_2[M-1] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_1[L-1] & u_1[L] & \cdots & u_1[L+M-2] \\ u_2[L-1] & u_2[L] & \cdots & u_2[L+M-2] \end{bmatrix}$$

Outro conceito importante utilizado nessas deduções são os conceitos das matrizes de observabilidade e controlabilidade. A matriz de observabilidade é definida em (3.55) e a matriz de controlabilidade é definida em (3.56) (CHEN, 1999). Por fim, Katayama (2005) define uma matriz bloco Toeplitz apresentada em (3.57).

$$\mathcal{O}_L = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{L-1} \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$\mathcal{C}_L = [B \quad AB \quad \cdots \quad AB^{L-1}] \quad (3.56)$$

$$\psi_L = \begin{bmatrix} D & & & 0 \\ CB & D & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ CA^{L-2}B & \cdots & CB & D \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Utilizando as definições de (3.55) a (3.57), é possível reescrever (3.52) que relaciona os dados de entrada com os dados de saída e as matrizes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$ , por (3.58) e (3.59).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y(t) \\ y(t+1) \\ \vdots \\ y(t+L-1) \end{bmatrix} &= \\ &= \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{L-1} \end{bmatrix} \cdot x(t) + \begin{bmatrix} D & & & 0 \\ CB & D & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ CA^{L-2}B & \cdots & CB & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u(t) \\ u(t+1) \\ \vdots \\ u(t+L-1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.58)$$

$$y_L(t) = \mathcal{O}_L \cdot x(t) + \psi_L \cdot u_L(t) \quad (3.59)$$

Com a matriz  $X_0 = [x(0) \quad x(1) \quad \cdots \quad x(N-1)]$  dos estados, chega-se à relação (3.60). Chama-se a atenção para esta equação, pois

será de grande importância ao desenvolvimento dos métodos apresentados na sequência.

$$Y_{0|L-1} = \mathcal{O}_L X_0 + \psi_L U_{0|L-1} \quad (3.60)$$

### 3.8.2 Método N4SID

Para o desenvolvimento deste método, utilizou-se como base as referências Van Overschee *et al.* (1996), Katayama (2005), Vanfretti *et al.* (2011) e Prioste (2011).

O Método *Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification*, ou simplesmente Método N4SID é um dos métodos de identificação de subespaço de estados mais estudados. Na abordagem feita por Katayama (2005) o método N4SID é determinístico, ou seja, a entrada  $u$  do sistema precisa ser conhecida. Porém, para aplicar este método para identificar oscilações eletromecânicas em sistemas elétricos de potência, é necessário ter informações da entrada do sistema elétrico, o que tornaria a abordagem de Katayama (2005) impraticável na maioria dos casos. Como alternativa, adaptou-se essa abordagem inicialmente determinística e considerou-se que a entrada do sistema é um ruído branco que modela as variações aleatórias da carga (VANFRETTI *et al.*, 2011) (HAUER *et al.*, 1991).

O método N4SID, descrito por Katayama (2005), inicia com a montagem das matrizes de dados  $U$  e  $Y$ . Para isto, é preciso que o usuário defina a quantidade de blocos linhas ( $L$ ) (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) que estas matrizes deverão conter. É preciso que o valor  $L$  escolhido seja maior do que a ordem  $n$  do modelo. Valores adequados para  $L$  e  $n$ , aplicados a sincrofasores, são apresentados no capítulo seguinte.

Os estados do sistema são divididos em estados passados ( $p$ ) e futuros ( $f$ ), com isto reescreve-se (3.60) por (3.61).

$$\begin{aligned} Y_p &= \mathcal{O}_L X_p + \psi_L U_p \\ Y_f &= \mathcal{O}_L X_f + \psi_L U_f \end{aligned} \quad (3.61)$$

Define-se:

$$\begin{aligned}
 W_p &:= \begin{bmatrix} U_p \\ Y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{0|L-1} \\ Y_{0|L-1} \end{bmatrix} \\
 W_f &:= \begin{bmatrix} U_f \\ Y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{L|2L-1} \\ Y_{L|2L-1} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.62}$$

Utilizando a decomposição LQ (ANEXO A – Decomposição LQ) nas matrizes de entrada e saída, obtém-se (3.63)

$$\begin{bmatrix} U_f \\ W_p \\ Y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 \\ L_{21} & L_{22} & 0 \\ L_{31} & L_{32} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{Q}_1^T \\ \bar{Q}_2^T \\ \bar{Q}_3^T \end{bmatrix} \tag{3.63}$$

Manipulando (3.63), tem-se:

$$Y_f = L_{31} \cdot \bar{Q}_1^T + L_{32} \cdot \bar{Q}_2^T$$

$$\bar{Q}_2^T = L_{22}^\dagger \cdot (W_p - L_{21} \cdot \bar{Q}_1^T)$$

$$\bar{Q}_1^T = L_{11}^{-1} \cdot U_f$$

$$Y_f = [L_{32} \cdot L_{22}^\dagger] \cdot W_p + [(L_{31} - L_{32} \cdot L_{22}^\dagger \cdot L_{21}) \cdot L_{11}^{-1}] \cdot U_f \tag{3.64}$$

Comparando (3.64) com (3.61), chega-se a relação que:

$$\xi = L_{32} \cdot L_{22}^\dagger \cdot W_p = \mathcal{O}_L \cdot X_f \tag{3.65}$$

$$(L_{31} - L_{32} \cdot L_{22}^\dagger \cdot L_{21}) \cdot L_{11}^{-1} = \psi_L \tag{3.66}$$

Note que as relações (3.65) e (3.66) são válidas porque o espaço vetorial de  $X_f$  está contido na interseção entre os estados  $W_p$  e  $W_f$ .

$$\text{span}(X_f) \subset \text{span}(W_p) \cap \text{span}(W_f)$$

Essa relação pode ser entendida de outra forma, visto que o estado futuro dependerá das entradas do passado e também da entrada presente.

Para a determinação da ordem, faz-se a decomposição em valores singulares de (3.65), no qual estipulam-se os limites para os valores singulares mais significativos, como feito no métodos HTLS e Feixe de Matrizes. Obtém-se assim a relação (3.67).

$$\xi = [\hat{U} \quad U_0] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\Sigma} & 0 \\ 0 & \Sigma_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V} \\ V_0 \end{bmatrix}^* = \hat{U} \hat{\Sigma} \hat{V}^T \quad (3.67)$$

em que:

$$n = \dim(\hat{\Sigma}) \quad (3.68)$$

$$\xi = O_L X_f \in \mathfrak{R}^{L \cdot m \times N} \quad (3.69)$$

$$O_k = \hat{U} \cdot \hat{\Sigma}^{\frac{1}{2}} \in \mathfrak{R}^{L \cdot m \times n} \quad (3.70)$$

$$X_f = \hat{\Sigma}^{\frac{1}{2}} \cdot \hat{V}^T \in \mathfrak{R}^{L \times N} \quad (3.71)$$

O valor de  $n$  pode ser estipulado manualmente. Para isso, deve-se ter uma noção do sistema de forma a assegurar que apenas  $n$  autovalores serão significativamente maiores do que 0.

Considerando também que:

$$\bar{X}_{L+1} := [x(L+1) \quad \cdots \quad x(L+N-1)] \quad (3.72)$$

$$\bar{X}_L := [x(L) \quad \cdots \quad x(L+N-2)] \quad (3.73)$$

$$\bar{U}_{L|L} := [u(L) \quad \cdots \quad u(L+N-2)] \quad (3.74)$$

$$\bar{Y}_{L|L} := [y(L) \quad \cdots \quad y(L+N-2)] \quad (3.75)$$

Então, com base na equação de espaço de estados (3.51), chega-se na forma de (3.76).

$$\begin{bmatrix} \bar{X}_{L+1} \\ \bar{Y}_{L|L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{X}_L \\ \bar{U}_{L|L} \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

A solução de (3.76) é obtida através dos métodos de mínimos quadrados, como apresentado em (3.77).

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} \bar{X}_{L+1} \\ \bar{Y}_{L|L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{X}_L \\ \bar{U}_{L|L} \end{bmatrix}^T \right) \cdot \left( \begin{bmatrix} \bar{X}_L \\ \bar{U}_{L|L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{X}_L \\ \bar{U}_{L|L} \end{bmatrix}^T \right)^{-1} \quad (3.77)$$

Como a ordem  $n$  foi pré-definida, encontra-se a matriz  $A$  como sendo as  $n$  primeiras linhas e colunas da matriz (3.77). As características dos modos de oscilação do sistema são obtidas a partir dos autovalores da matriz  $A$  (3.78) utilizando a Tabela 3.1.

$$\lambda = \text{autovalores}(A) \quad (3.78)$$

Para a aplicação do método N4SID, pode-se utilizar o algoritmo apresentado na sequência.

#### Algoritmo para o método N4SID

- 1) Montar as matrizes de Hankel  $U_f$ ,  $W_p$  e  $Y_f$ , conforme (3.62), definindo o número de bloco linha  $L$  e ordem  $n$ ;
- 2) Fazer a decomposição LQ conforme (3.63);
- 3) Construir a matriz  $\xi$ , (3.65);
- 4) Decompor  $\xi$  em valores singulares e obter  $\hat{U}$ ,  $\hat{V}$  e  $\hat{\Sigma}$ , (3.67);
- 5) Determinar as matrizes de  $\mathcal{O}$ ,  $X$ ,  $U$  e  $Y$ , (3.70) a (3.75);
- 6) Encontrar a matriz  $A_{n \times n}$ , solucionando (3.77);
- 7) Calcular os autovalores  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) da matriz  $A$ ;
- 8) Encontrar as demais características dos modos pelas equações da Tabela 3.1.

### 3.8.3 Método da Realização Balanceada Estocástica

O Método da Realização Balanceada Estocástica (RBE) é apresentado em Katayama (2005) que introduz diversos conceitos antes da apresentação do método, como o Filtro de Kalman e Análise de Correlação Canônica (CCA – *Canonical Correlation Analysis*). A descrição completa desse método é bastante extensa e pode ser encontrada nas referências Katayama (2005) e Van Overschee (1996). Para esta modelagem, são apresentados apenas os principais passos para a obtenção da matriz  $A$  e os conceitos básicos envolvendo este método.

Em uma realização puramente estocástica, não é necessário fazer a modelagem da entrada do sistema. No caso do método RBE, o que se

faz é utilizar o ganho do filtro de Kalman e técnicas de estocasticidade para a estimação do modelo linear. As equações de espaço de estados para o caso estocástico são apresentadas em (3.79) (KATAYAMA, 2005).

$$\begin{aligned} x[k+1] &= A \cdot x[k] + K \cdot e[k] \\ y[k] &= C \cdot x[k] + e[k] \end{aligned} \quad (3.79)$$

O algoritmo descrito no presente trabalho segue os passos apresentados por Katayama (2005). Utilizam-se as mesmas matrizes  $Y_p$  e  $Y_f$  descritas em (3.54) e (3.62) do método N4SID, no qual se necessita especificar a quantidade ( $L$ ) de blocos linha destas matrizes.

A matriz de covariância dos dados é obtida por (3.80).

$$\frac{1}{N} \begin{bmatrix} Y_p \\ Y_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_p^T & Y_f^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{pp} & \Sigma_{pf} \\ \Sigma_{fp} & \Sigma_{ff} \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

Utilizando a decomposição LQ (ANEXO A – Decomposição LQ) obtém-se a relação (3.81).

$$\frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} Y_p \\ Y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

Multiplicando a equação (3.81) por ela mesma, e comparando o resultado com a equação (3.80), obtém-se as seguintes relações:

$$\begin{aligned} \Sigma_{fp} &= L_{21} L_{11}^T \\ \Sigma_{ff} &= L_{21} L_{21}^T + L_{22} L_{22}^T \\ \Sigma_{pp} &= L_{11} L_{11}^T \end{aligned} \quad (3.82)$$

Posteriormente, é preciso encontrar as matrizes  $L$  e  $M$  que são as raízes quadradas das matrizes de covariância  $\Sigma_{ff}$  e  $\Sigma_{pp}$ .

$$\begin{aligned} \Sigma_{ff} &= LL^T \\ \Sigma_{pp} &= MM^T \end{aligned} \quad (3.83)$$

Conhecidas as matrizes  $L$  e  $M$ , faz-se a decomposição em valores singulares da matriz normalizada  $\Sigma_{fp}$ , dado por (3.84).

$$L^{-1}\sum_{fp}M^{-T} = U\Sigma V^T \approx \widehat{U}\widehat{\Sigma}\widehat{V}^T \quad (3.84)$$

A representação das matrizes com (^) simboliza que foram considerados apenas os  $n$  maiores valores singulares, como feito no método HTLS e Feixe de Matrizes (ver equação (3.67)).

A matriz de observabilidade para o método RBE é dada pela equação (3.85).

$$\mathcal{O}_L = L\widehat{U}\widehat{\Sigma}^{\frac{1}{2}} \quad (3.85)$$

Por fim, a matriz  $A$  da equação de estados é encontrada utilizando a relação (3.86).

$$A = \mathcal{O}_L^{\downarrow\uparrow}\mathcal{O}_L^{\uparrow} \quad (3.86)$$

Os modos do sistema são determinados através dos autovalores  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) da matriz  $A_{n \times n}$  em (3.87). As características das oscilações são obtidas utilizando as relações apresentadas na Tabela 3.1.

$$\lambda = \text{autovalores}(A) \quad (3.87)$$

Para a aplicação do método RBE, pode-se utilizar o algoritmo apresentado na sequência.

#### **Algoritmo para o método RBE**

- 1) Montar as matrizes de Hankel  $Y_p$  e  $Y_f$ , definindo o número de bloco linha  $L$  e ordem  $n$ ;
- 2) Fazer a decomposição LQ, conforme (3.81);
- 3) Montar as matrizes  $\Sigma$  de (3.82);
- 4) Solucionar (3.83) para encontrar as matrizes  $L$  e  $M$ ;
- 5) Decompor  $L^{-1}\sum_{fp}M^{-T}$ , em valores singulares, conforme (3.84);
- 6) Determinar a matriz de observabilidade  $\mathcal{O}$  por (3.85);
- 7) Encontrar a matriz  $A = \mathcal{O}_L^{\downarrow\uparrow}\mathcal{O}_L^{\uparrow}$ , por (3.86);
- 8) Calcular os autovalores  $\lambda$  da matriz  $A$ ;
- 9) Encontrar as demais características dos modos pelas equações da Tabela 3.1.

### 3.9 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento do problema de oscilação eletromecânica, assim como a modelagem matemática de metodologias para identificação dessas oscilações a partir de dados fasoriais sincronizados.

Os métodos abordados foram DFT, Wiener-Hopf, Prony, HTLS, Feixe de Matrizes, N4SID e RBE. Essas metodologias, com exceção da DFT que se trata de análise espectral, foram desenvolvidas para encontrar os autovalores  $\lambda$  da matriz  $A$  do modelo linear do sistema ou os polos  $\lambda$  da função de transferência que modela o sistema. A partir dos valores  $\lambda$  é possível determinar as características das oscilações eletromecânicas em termos de frequência, amortecimento, amplitude, fase e energia.

Esses métodos foram implementados computacionalmente utilizando o ambiente DFAM, pertencendo ao módulo 5 de Análises de Oscilações Eletromecânicas.

O exemplo numérico para os métodos aplicáveis em situações de *ringdown* é apresentado no “APENDICE C – Aplicação Numérica dos Métodos para Ringdown”. Com esse exemplo é possível visualizar a montagem das matrizes e acompanhar os passos necessários nos algoritmos dessas metodologias.



## 4 TÉCNICAS PARA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE DE OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS

O presente capítulo descreve estudos de ajustes de parâmetros necessários para a correta aplicação das metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas descritas no capítulo anterior, tais como: aplicabilidade dos métodos em cada caso, tamanho da janela, taxa de amostragem dos sinais, ordem do modelo e dimensão das matrizes de entrada. Essas propostas objetivam auxiliar o usuário das metodologias no momento de utilizá-las em dados reais de SPMS. Ao fim, os parâmetros são validados através de simulação de um modelo computacional simplificado, ilustrando a aplicabilidade dos métodos e a eficiência das propostas de ajustes.

### 4.1 INTRODUÇÃO

A literatura apresenta uma grande quantidade de métodos para identificação de oscilações em sinais. No entanto, dificuldades são encontradas no momento de se utilizar esses métodos em dados reais provenientes de SPMS. Estas dificuldades estão na definição da ordem do modelo; na quantidade mínima e máxima de dados, ou seja, no tamanho da janela de tempo que os métodos devem processar; na dimensão das matrizes de entrada e na correta identificação dos casos em que determinados tipo de métodos não se aplicam.

Como as metodologias apresentadas nas literaturas especializadas são genéricas e aplicáveis a diferentes tipos de sistemas, não existem propostas para ajuste destes parâmetros aplicados especificamente a dados sincrofasoriais, restando ao usuário da metodologia escolhê-las.

O problema em se aplicar essas metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas utilizando dados reais é a incerteza quanto ao valor verdadeiro do modo. Por isto, é importante que se tenham metodologias bem calibradas e adequadamente testadas para que essas forneçam ao usuário resultados próximo do real. Isso facilita os estudos a serem realizados, e simplifica o trabalho e o conhecimento exigido do analista.

Contudo, foi criado um conjunto de regras básicas, válidas para o processamento de dados fasoriais. Essas regras foram criadas com base em trabalhos anteriores, em resultados estatísticos e na experiência adquirida no presente trabalho, a partir de dados reais do SPMS MedFasee BT. As propostas apresentadas auxiliam nas estimativas

iniciais das metodologias, fornecendo bons resultados para a maioria dos casos. Entretanto, a decisão final continuará sendo do responsável pelo estudo em interpretar e decidir pelo resultado final.

#### 4.2 REAMOSTRAGEM DE SINAIS

Os dados fasoriais são disponibilizados a uma taxa de 60 fasores/s. Em algumas aplicações é necessário que estes dados sejam reamostrados para uma taxa menor.

Por exemplo, ao se trabalhar com um conjunto de dados de 24h não se recomenda utilizar a taxa máxima de dados (60 fasores/s) devido ao volume de dados que necessitarão ser armazenados e processados. Para 24h, contando as medidas trifásicas de tensão e corrente, totalizam aproximadamente 31 milhões de medidas para cada PMU. Como o padrão de armazenamento dos arquivos de dados utilizados como entrada para o DFAM é ASCII, seriam criados arquivos de dados com cerca de 10 Gb por PMU. Com arquivos deste tamanho, é demandado um sobre-esforço computacional tanto para o processamento quanto para o armazenamento desses arquivos.

O DFAM não possui funcionalidade de busca de dados ao PDC. Assim a reamostragem precisa ser realizada pelo programa de buscas, que no caso do SPMS Medfasee BT é feita pelo programa MDF (DECKER *et al.*, 2011).

Para fazer a reamostragem de um sinal é preciso estar atento ao critério de Nyquist (LATHI, 2004). Em resumo, o critério de Nyquist postula que para um sinal no qual a máxima componente de frequência é  $f_1$ , deve-se efetuar uma reamostragem a uma taxa maior do que  $2 \times f_1$ . Caso isso não seja respeitado, surgirá no espectro de frequências uma componente “fantasma” que será o *Aliasing* da frequência  $f_1$ . O *Aliasing* é quantificado por (4.1) (LYONS, 2004 p. 23).

$$\min: f(n) = |f_{\text{sinal}} - n \cdot f_{\text{amostr}}| \quad (4.1)$$

onde:

$n = 0, 1 \dots \infty$

$f(n)$  = Todos os sinais que possuem a mesma amostragem.

$f_{\text{sinal}}$  = Frequência do sinal

$f_{\text{amostr}}$  = Frequência de amostragem

Analisando essa equação, percebe-se que quando o valor mínimo ocorre para  $n = 0$ ,  $f(0) = f_{\text{signal}}$ , o sinal ficará com suas componentes preservadas. Isso ocorre sempre que  $f_{\text{amos}} > 2 \times f_{\text{signal}}$ , ou seja, sempre que o critério de Nyquist for respeitado.

Para o melhor entendimento da equação (4.1), consideram-se os seguintes exemplos:

#### Exemplo 4.1

Dado um sinal qualquer com  $f_{\text{signal}} = 3\text{Hz}$ , será utilizada uma frequência de amostragem  $f_{\text{amos}} = 4\text{Hz}$ . Aplicando (4.1), tem-se:

$$f(0) = |3 - 0.4| = 3$$

$$f(1) = |3 - 1.4| = 1 \rightarrow \text{Mínimo } f(n) \text{ para } n \neq 0.$$

$$f(2) = |3 - 2.4| = 5$$

$$f(3) = |3 - 3.4| = 9$$

Observe-se que o  $f(n)$  mínimo ocorre para um  $n \neq 0$ , dessa forma, o sinal que inicialmente era de  $3\text{Hz}$ , ao ser amostrado passa a ter uma frequência de  $f(1) = 1\text{Hz}$ , como efeito do *Aliasing* do sinal de  $3\text{Hz}$  incorretamente amostrado. Esse efeito pode ser visto no espectro de frequências da Figura 4.1.

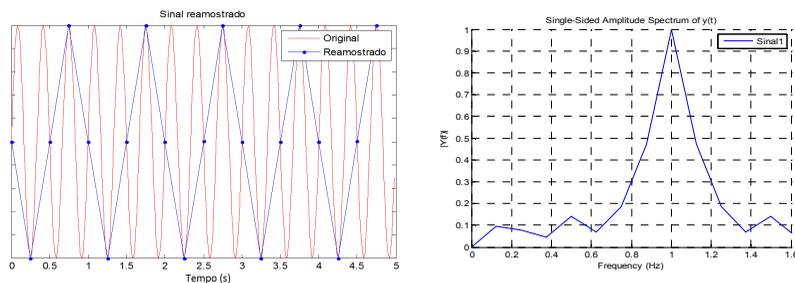


Figura 4.1 – a) Sinal reamostrado. b) Espectro de frequências.

## Exemplo 4.2

Dado um sinal com  $f_{\text{signal}} = 3\text{Hz}$ , amostrado a uma taxa de  $f_{\text{amos}} = 10\text{Hz}$ , tem-se as seguintes relações através da equação (4.1).

$$f(0) = |3 - 0.10| = 3 \rightarrow \text{Mínimo } f(n) \text{ para } n = 0.$$

$$f(1) = |3 - 1.10| = 7$$

$$f(2) = |3 - 2.10| = 17$$

$$f(3) = |3 - 3.10| = 27$$

A menor frequência que possui a mesma amostragem ocorre em  $n = 0$ , indicando que não ocorre *Aliasing* nesse sinal, e a frequência identificada é  $f(0) = 3\text{Hz}$ , como pode ser visto na Figura 4.2.

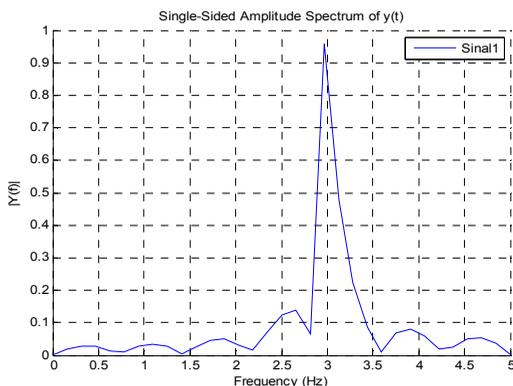


Figura 4.2 – DFT sem *Aliasing*.

Portanto, para evitar o efeito *Aliasing*, é necessário efetuar uma pré-filtragem nos dados originais para que sejam eliminadas todas as componentes que possuam frequências superiores à duas vezes a frequência de amostragem desejada. Isso é obtido com a aplicação de um filtro passa-baixas, sintonizado em  $2 \times f_{\text{amos}}$ , que deve ficar sob a responsabilidade do programa de busca de dados utilizado.

Ao realizar uma análise utilizando dados fasoriais, principalmente análises de oscilações eletromecânicas, é preciso estar atento ao efeito *aliasing*. Como os modos de oscilações estão contidos dentro de uma faixa que varia de 0,01 a 3 Hz (Seção 3.2), recomenda-se uma taxa de amostragem mínima de 10 fasores/s.

Em estudos de *ringdown* os tempos envolvidos são relativamente pequenos e variam de 5 a 30 segundos. Como as metodologias

aplicáveis nessa situação são baseadas na reconstrução do sinal, quanto maior a taxa de amostragem melhor a aproximação. Portanto, recomenda-se a utilização da máxima taxa de amostragem disponível, no caso dos SPMS MedFasee 60 fasores/s. Em estudos de dados ambiente os tempos envolvidos variam de 1 a 24h, sendo recomendada a reamostragem utilizando taxas de 10 a 20 fasores/s.

Em resumo, para que seja atendido o critério de Nyquist e ocorra a redução do esforço computacional, recomenda-se a reamostragem do sinal de acordo com os valores apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Taxa de amostragem.

<b>Tipo de análise</b>	<b>Taxa de Amostragem [fasores/s]</b>
<i>Ringdown</i>	$f_{amost} = 60$
Dados ambiente	$10 \leq f_{amost} \leq 20$

### 4.3 JANELAS DE ANÁLISE

A escolha da janela de análise é de fundamental importância nos estudos de oscilações eletromecânicas. A qualidade dos resultados fornecidos pelos métodos dependerá de uma boa escolha por parte do usuário.

Nos capítulos anteriores foi apresentada a diferença entre *ringdown* e dados ambiente. A escolha da janela de análise dependerá do tipo de fenômeno que se deseja estudar. Durante o *ringdown*, o sistema elétrico está sofrendo várias ações de controle e mudanças de topologia, de forma a manter o sistema estável, desta maneira não se pode considerar que durante este período o sistema elétrico esteja em condição estacionária. Por isso, é preciso utilizar janelas de tempo pequenas sintonizadas somente na oscilação, evitando intervalos em que estejam evidentes as descontinuidades, por exemplo, degraus nas curvas ou variações instantâneas na amplitude das oscilações. Sugere-se então que para análises em *ringdown* sejam utilizadas as janelas de tempos na ordem de 10 a 20 segundos.

Em análise de dados ambiente, onde a única variação do sistema elétrico é decorrente das pequenas variações de carga, considera-se que o sistema elétrico é estacionário durante longos períodos. Porém, sabe-se que ao longo do tempo podem ocorrer saídas de usinas e cargas. Por isso é preciso ter certo cuidado em se utilizar janelas muito grandes.

Para isso, recomenda-se utilizar em dados ambiente janelas que variam de 10 a 15 minutos, conforme os parâmetros utilizados por Pierre *et al.* (1997), Vanfretti *et al.* (2011) e Prioste (2011).

Em resumo, recomenda-se utilizar janelas de tempo conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Janelas de tempo.

<b>Período de análise</b>	<b>Janela de tempo</b>
<i>Ringdown</i>	$10 \leq t \leq 20$ segundos
Dados ambiente	$10 \leq t \leq 15$ minutos

### 4.3.1 Processamento por janelas deslizantes

A técnica de processamento por janelas deslizantes é aplicada para acompanhar a evolução de uma oscilação eletromecânica ao longo do tempo.

Para viabilizar a aplicação dessa técnica, é necessário escolher dois parâmetros. O primeiro é a janela de tempo de análise definida na Tabela 4.2 e o segundo é o passo dessa janela, que deve ser ajustado de acordo com o número de pontos de interesse.

A Figura 4.3 (a), (b) e (c) ilustra a aplicação da técnica por janelas deslizantes no cálculo da frequência e amortecimento de um sinal. A figura (a) esboça um sinal com uma componente de 0,36 Hz e amortecimento nulo. A figura (b) ilustra as componentes de frequência encontradas no sinal e a figura (c) apresenta o amortecimento determinado para o sinal. Observe-se que o ponto da frequência e do amortecimento calculado pelos métodos é atribuído ao final da janela.

Para efetuar esse cálculo, foi definida uma janela de 30 segundos que desliza a cada 10 segundos. Assim, calculam-se os modos de oscilação para a Janela 1 que vai de 0 a 30 segundos, os valores de frequência e amortecimento encontrados são esboçados nos respectivos gráficos no ponto final da janela, ou seja, no segundo 30. Concluída esta etapa, o algoritmo avança para a Janela 2 com um passo de 10 segundos e determinam-se a frequência e o amortecimento para a janela que vai do segundo 10 ao 40, e assim sucessivamente até que se chegue ao final do período.

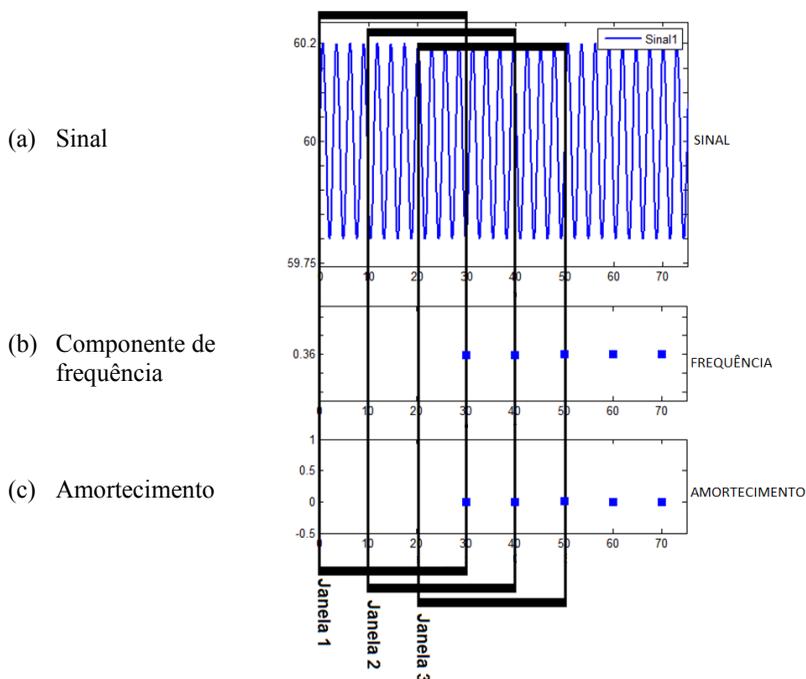


Figura 4.3 – Análise de sinais por janelas deslizantes.

Os métodos paramétricos encontram  $n$  (ordem do modelo) modos de oscilações. Para obter o modo desejado é necessário definir os critérios de escolha, como a faixa provável da frequência da oscilação e o índice de detecção modal adotado. Para definir a faixa de valores de frequência, devem-se conhecer os valores prováveis para o modo em questão. Por exemplo, o modo norte-sul do SIN se encontrará em uma faixa que varia de 0,2 a 0,4 Hz, (Seção 3.4). Mesmo com a definição dessa faixa de valores, modos espúrios surgirão nesta faixa, sendo necessário estipular alguns parâmetros para a escolha, baseados nos Índices de Dominância Modal (PRIOSTE, 2011). No presente trabalho, optou-se pelo modo de maior amplitude ou de maior energia contido no intervalo.

#### 4.4 APLICABILIDADE DOS MÉTODOS: *Ringdown* e Dados ambiente

No capítulo anterior, foram apresentados os conceitos de *ringdown* e dados ambiente. Em cada uma destas situações é preciso utilizar um método adequado para que se tenham melhores resultados.

No exemplo do sistema massa mola (Seção 3.5), demonstrou-se que para situação em que se têm dados ambiente não é adequada utilizar metodologias baseadas na reconstrução do sinal.

Os métodos baseados na estimação do modelo linear do sistema ou de correlação necessitam de uma quantidade grande de pontos e longos períodos de tempo para que a qualidade do resultado não seja prejudicada. Porém, ao se estudar dados em *ringdown*, tem-se um curto período de tempo, devido aos transitórios elétricos serem, normalmente, de curta duração. Assim, os métodos baseados na estimação do modelo linear do sistema e de correlação são indicados para aplicação em dados ambiente, em que se têm tempos longos com uma quantidade de pontos suficiente para atender aos requisitos básicos de desempenho. Resume-se a aplicabilidade dos métodos pelo fluxograma da Figura 4.4.

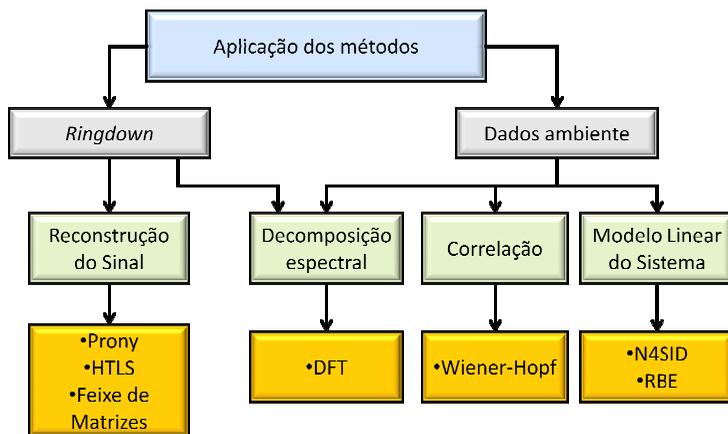


Figura 4.4 – Aplicação dos métodos.

#### 4.5 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

A principal vantagem da Transformada Discreta de Fourier está em poder ser aplicada tanto para *ringdown* quanto para dados ambiente,

o que possibilita validar os resultados dos demais métodos em termos de frequência. No entanto, é preciso tomar cuidado para se evitar o *Aliasing* (Seção 4.2) e o vazamento espectral descrito na sequência desta seção. A principal desvantagem da DFT é não fornecer valores de amortecimento.

A aplicação da técnica de janelas deslizantes na DFT apresenta uma pequena diferença em relação ao demonstrado na Figura 4.3. Como a DFT não possui o cálculo do amortecimento, os resultados são apresentados na forma de sucessivos espectros de frequências esboçados ao longo do tempo em gráficos tridimensionais.

Para exemplificar, considera-se o sinal da Figura 4.5(a), que ilustra os primeiros 25 segundos de um sinal de 10 minutos. A Figura 4.5(b) apresenta o espectro de frequência determinado pela aplicação da DFT com janelas deslizantes. Por esta figura tem-se no eixo horizontal os valores das componentes de frequência, no eixo vertical a amplitude desta componente e no eixo “z” (entrando na folha) o tempo. Observe-se, nesse exemplo, que foi possível determinar quatro componentes, sendo elas de 0,3; 0,48; 0,65 e 1,8 Hz. Apesar de a DFT não apresentar os valores de amortecimento, nota-se que a componente de 0,65 Hz se atenua ao longo do tempo, o que indica que esta componente possui amortecimento.

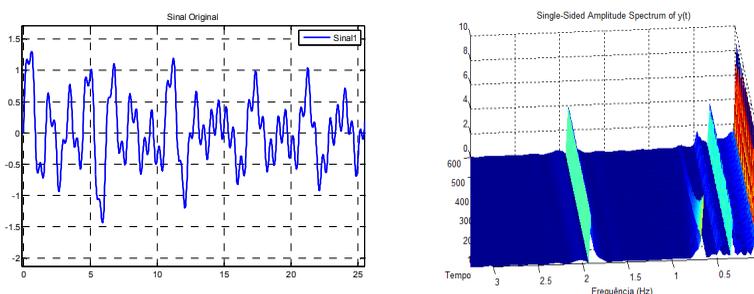


Figura 4.5 – DFT com janelas deslizantes.

#### 4.5.1 Vazamento espectral

O vazamento espectral surge devido ao sinal de entrada da DFT ser um sinal finito e a DFT, conceitualmente, necessita que o sinal seja infinito. Dessa forma, o sinal de entrada é repetido infinitas vezes. Tome-se como exemplo a Figura 4.6, (LYONS, 2004, p.80). Dado o sinal da figura (a), deseja-se analisar pela DFT apenas um pequeno intervalo do sinal (figura (c)). Para isso, multiplica-se o sinal da figura

(a) pela janela retangular da figura (b), obtendo assim o sinal de entrada desejado da figura (c).

O problema que surge com a DFT está justamente neste truncamento do sinal. Se o período da janela (b) não for um múltiplo exato do período da frequência do sinal (c), ocorrerá o vazamento espectral (LYONS, 2004, p.80).

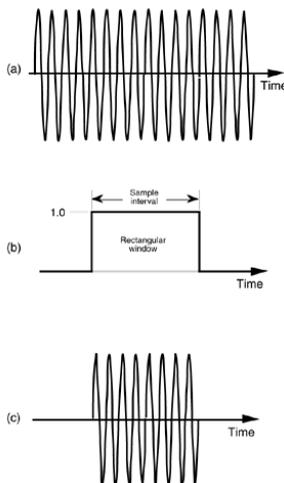


Figura 4.6 – Sinal de entrada para a DFT, com janela retangular.

Para melhor entendimento do vazamento espectral, utiliza-se o seguinte exemplo. Suponha-se que um sinal possua duas componentes de frequência uma de 0,25 Hz, do qual o período é de 4 segundos, e outra de 0,8 Hz do qual o período é de 1,25 segundos, como apresentado na Tabela 4.3 e Figura 4.7.

Tabela 4.3 – Componentes do sinal.

Componente	Frequência [Hz]	Período [s]
1	0,25	4
2	0,80	1,25

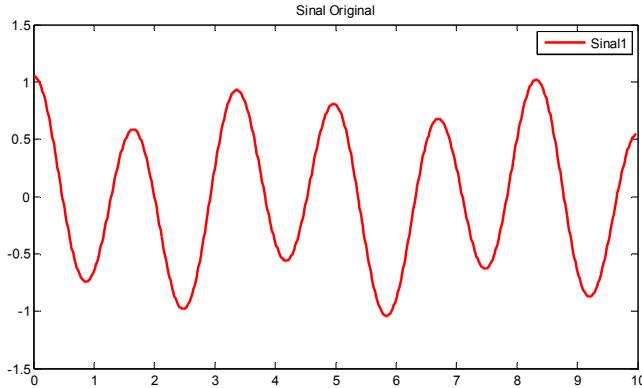


Figura 4.7 – Sinal criado com 0,25 e 0,8 Hz.

A DFT possui a capacidade de detectar com precisão as frequências nos quais os períodos sejam múltiplos do tamanho da janela ( $t_{win}$ ). Por isso, é necessário que a janela selecionada para o processamento pela DFT esteja ajustada com uma quantidade inteira de ciclos.

No primeiro exemplo, aplica-se a DFT para o cálculo do espectro de frequências do sinal para uma janela de 10s. Com 10s a janela fica ajustada para 8 ciclos inteiros da frequência de 0,8 Hz e 2,5 ciclos do sinal de 0,25 Hz. Dessa forma, é possível identificar perfeitamente a componente de 0,8 Hz, mas não é possível identificar com precisão a componente de 0,25 Hz. Ocorre então o vazamento espectral para a componente de 0,25 Hz, ilustrado pelo espectro de frequências da Figura 4.8.

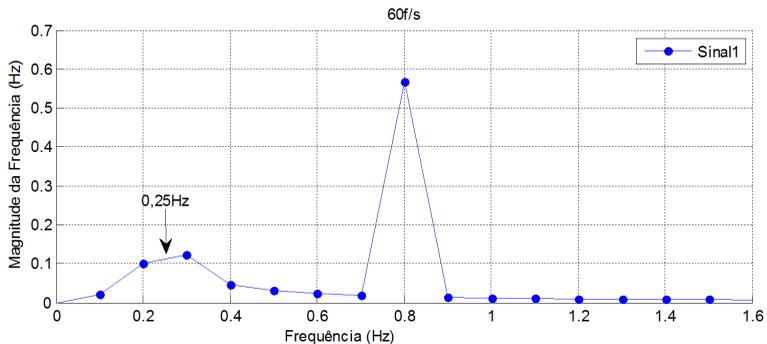


Figura 4.8 – DFT para uma janela de 10s.

Se a janela de tempo for alterada para 8s, ocorrerá o inverso do caso anterior, pois com 8s ficam seleccionados 2 ciclos completos da componente de 0,25 Hz e 6,4 ciclos da componente de 0,8 Hz. Desta forma, ocorrerá o vazamento espectral para a componente de 0,8 Hz que não será identificada com precisão, ao contrário da componente de 0,25 que é perfeitamente identificada.

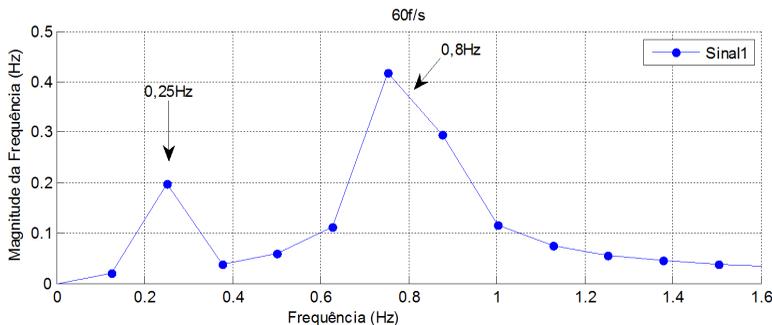


Figura 4.9 – DFT para janela de 8s.

Se for escolhida uma janela de 20s os dois modos serão identificados sem nenhum erro, pois esta janela sintoniza 5 ciclos da componente de 0,25 Hz e 16 ciclos da componente de 0,8 Hz, como pode ser notado no espectro de frequências da Figura 4.10.

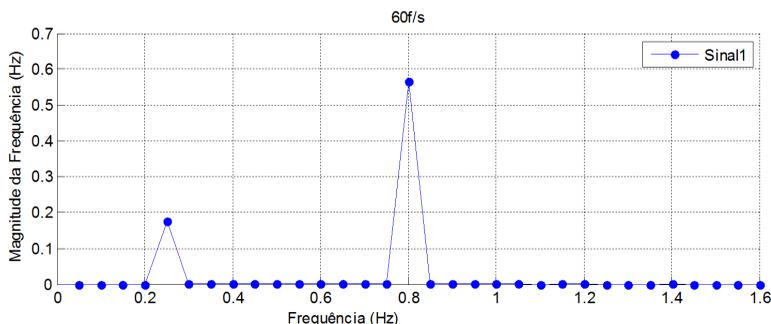


Figura 4.10 – DFT para Janela de 20s.

Em análise de oscilações eletromecânicas não é possível saber o valor exato da frequência da oscilação. Este fato dificulta o ajuste adequado da janela de dados e a consequente eliminação do vazamento espectral.

Nota-se nas figuras anteriores que a DFT encontra um ponto a cada  $1/t_{win}$ . Assim, quanto maior a janela, melhor será a resolução e mais próximo se chegará da resposta. Porém, em análise de regime transitório a oscilação perdura por poucos segundos, o que limita o tamanho da janela. Além disso, o sistema elétrico é não estacionário e na medida em que se aumenta o tempo da janela, a probabilidade de que as não estacionariedades influenciem na resposta aumenta. Assim, é preciso estar atendo a este problema e fazer as escolhas de acordo com a necessidade. O erro máximo causado pelo vazamento espectral é dado por (4.2).

$$Max_{Erro} \leq \pm \frac{1}{2 \cdot t_{win}} \quad (4.2)$$

Para reduzir o efeito do vazamento espectral é possível utilizar as técnicas de janelamento (LYONS, 2004). Entre as técnicas conhecidas mencionam-se as janelas Hann, Hamming, Kaiser, Blackman, Blackman-Harris e outras (ZIERHOFER, 2008). Entretanto, para a análise de oscilações eletromecânicas, não se recomenda a utilização de técnicas de janelamento, pois estas janelas, em sua maioria, causam atenuação nas extremidades dos períodos.

#### 4.6 MÉTODO DE PRONY

O método de Prony (Seção 3.7.1) é um método paramétrico indicado para identificação de oscilações eletromecânicas durante períodos transitórios ou *ringdown*.

A principal dificuldade encontrada ao se trabalhar com o método de Prony é a escolha da ordem do modelo. De acordo com Liu *et al.* (2007), é comum escolher uma ordem alta para o modelo, pois o método de Prony não é recomendado para sinais que possuam altos índices de ruídos. Assim, as componentes do sinal referentes a ruídos ficam com amplitudes baixas, facilitando o processo de identificação modal. A experiência da utilização desse método em dados do SPMS MedFasee BT indica que a ordem pode ser ajustado em 1/4 da quantidade de pontos ( $N$ ) da janela escolhida.

Para as metodologias aplicadas em *ringdown* é recomendável utilizar a taxa de amostragem máxima do SPMS, que no caso do SPMS MedFasee BT é de 60 fasores/s. Para um melhor resultado, é importante

utilizar a quantidade máxima de dados disponíveis, pois as metodologias empregadas para *ringdown* estão baseadas na reconstrução do sinal.

Ocorre que o volume de dados interfere diretamente no tempo de processamento. Por isso, recomenda-se utilizar tempos de no máximo 20 segundos e, em casos especiais, até 30 segundos de dados e não menos que 10 segundos.

A utilização dessas janelas de tempo pode ser justificada por dois motivos: o primeiro é o tempo de processamento. Observe-se, por exemplo, na matriz de cálculo dos resíduos em (3.17), na qual a dimensão da matriz  $Z$  é de  $(N \times n)$  (número de dados  $\times$  ordem do modelo), quando a janela de tempo selecionada for de 20 segundos, essa matriz atinge a dimensão de  $(1200 \times 300)$ . O segundo motivo está em assegurar a estacionariedade do sistema elétrico, pois durante o período transitório, os sistemas de proteção estão atuando, gerando mudanças na topologia da rede elétrica.

A Tabela 4.4 resume as propostas dessa seção.

Tabela 4.4 – Ajustes para o Método de Prony.

<b>Método de Prony</b>	
Ordem	$N/4$
Janela	$10s \leq t \leq 20s$
Taxa de Amostragem	$f_{amos} = 60 \text{ fasores/s}$

#### 4.7 MÉTODO HTLS – *Hankel Total Least Square*

O método HTLS (Seção 3.7.2) é também utilizado para análises em *ringdown*. Trata-se de um método bastante eficaz e equiparável ao método de Prony. Entre as principais dificuldades encontradas com este método, destaca-se a escolha da dimensão da matriz de Hankel de entrada e da ordem do modelo.

Considerando a matriz de Hankel em (4.3) (LIU *et al.*, 2007), três parâmetros precisam ser definidos, são eles  $M$  (número de colunas da matriz de Hankel),  $L$  (número de linhas de matriz de Hankel) e  $N$  (número de pontos do intervalo de análise).

$$H = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{M-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{L-1} & y_L & \cdots & y_N \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A quantidade de dados ( $N$ ) do intervalo é conhecida e dependerá do tempo selecionado. Para definir o número de linhas  $L$ , Liu *et al.* (2007) indicam que esse valor deverá ser maior do que a ordem ( $n$ ) do modelo ( $L > n$ ). O número de colunas ( $M$ ) fica automaticamente definido após ser escolhido um valor para  $L$ , através da relação  $M = N + 1 - L$ .

Resultados satisfatórios são encontrados para  $L$  variando de  $N/3$  a  $2N/3$ . No entanto, com a experiência na utilização do método percebeu-se que ao padronizar a montagem da matriz de Hankel de forma a deixá-la quadrada é suficiente para obter bons resultados.

Com isto, recomenda-se utilizar valores de  $L = M$  que é obtido quando se escolhe  $L = \frac{N+1}{2}$ . Quando o número de pontos  $N$  do intervalo for par,  $L$  será decimal, nesses casos sugere-se arredondar o resultado. Como consequência do arredondamento, a matriz de Hankel será retangular, o que não trará problemas aos resultados encontrados pelo método. Como alternativa pode-se incluir ou excluir um ponto da janela de forma a deixar uma quantidade de pontos  $N$  ímpar.

No caso do Projeto MedFasee, costuma-se definir janelas contendo períodos inteiros de tempo, ou seja de um segundo  $A$  até um segundo  $B$ . Utilizando 60 fasores/s,  $N$  será sempre um número inteiro par ( $N = 60 \times (B - A)$ ). Para que  $N$  seja ímpar, exclui-se sempre o último ponto do intervalo.

Além de definir a dimensão da matriz de Hankel, o usuário precisa especificar a tolerância que definirá a quantidade de valores singulares significativo, como descrito na seção (3.7.2). Ao decompor a matriz de Hankel em valores singulares (4.4), apenas os  $n$  maiores valores singulares relativos ( $\widehat{\Sigma}$ ) são considerados para a montagem da nova matriz de Hankel ( $\widehat{H}$ ) em (4.5).

$$H = [\widehat{U} \quad U_0] \cdot \begin{bmatrix} \widehat{\Sigma} & 0 \\ 0 & \Sigma_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{V} \\ V_0 \end{bmatrix}^H \quad (4.4)$$

$$\widehat{H} = \widehat{U} \widehat{\Sigma} \widehat{V} \quad (4.5)$$

Essa tolerância foi proposta no trabalho de Sarkar *et al.* (1995) que utiliza a tolerância de  $10^{-3}$  para o método Feixe de Matrizes e pode ser perfeitamente utilizada no método HTLS. Dessa forma, a ordem  $n$  do modelo é definida por (4.6), em que se consideram apenas os  $n$

valores singulares para os quais a relação com o máximo valor singular seja maior que  $10^{-3}$ .

$$n = \text{quantidade } \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} > 10^{-3}, c = 1 \dots \min(L, M) \quad (4.6)$$

Assim como no método de Prony, não se recomenda a utilização de grandes intervalos de tempo, que deverão se manter na faixa de 10 a 20 segundos.

A Tabela 4.5 resume as propostas dessa seção.

Tabela 4.5 – Ajustes para o método HTLS.

<b>Método HTLS</b>	
Número de linhas da matriz de Hankel	$L = \frac{N + 1}{2}$
Tolerância relativa para detecção de ordem	$\frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} > 10^{-3}$
Janela	$10s \leq t \leq 20s$
Taxa de Amostragem	$f_{amos} = 60 \text{ fasores/s}$

#### 4.8 MÉTODO FEIXE DE MATRIZES

O método Feixe de Matrizes (Seção 3.7.3) é aplicável durante os períodos de *ringdown*. As dificuldades encontradas para utilizar este método são determinar a dimensão das matrizes envolvidas e a tolerância para os valores singulares no momento de se determinar a ordem do modelo.

A matriz principal do método Feixe de Matrizes está repetida na equação (4.7), em que  $N$  é o número de pontos e  $M$  é o parâmetro *Pencil*.

$$Y = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \dots & y(M) \\ y(1) & y(2) & \dots & y(M+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-M-1) & y(N-M) & \dots & y(N-1) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Sarkar *et al.* (1995) sugerem que o parâmetro *Pencil* ( $M$ ) seja um número inteiro contido num intervalo que varia de  $N/3$  a  $N/2$ . A utilização desse método em dados fasoriais confirmou a eficiência de

uma escolha nesse intervalo, sendo o ponto médio  $M = 5N/12$  um valor suficiente.

Para a determinação da ordem do modelo, Sarkar *et al.* (1995) sugerem que sejam considerados os valores singulares que atendam à equação (4.8), sendo  $p=3$  um valor que fornece bons resultados.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} > 10^{-p} \quad (4.8)$$

A Tabela 4.6 resume as propostas dessa seção.

Tabela 4.6 – Ajustes para o Método Feixe de Matrizes.

<b>Método Feixe de Matrizes</b>	
Parâmetro <i>Pencil</i>	$M = \left[ \frac{N}{3}; \frac{N}{2} \right]$
Tolerância relativa para detecção de ordem	$\frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} > 10^{-3}$
Janela	$10s \leq t \leq 20s$
Taxa de Amostragem	$f_{amos} = 60 \text{ fasores/s}$

#### 4.9 MÉTODO N4SID

O método N4SID (Seção 3.8.2) (KATAYAMA, 2004) é indicado para aplicação em dados ambiente. A determinação do tamanho da janela, da ordem do modelo ( $n$ ) e do número de blocos linhas ( $L$ ) são os parâmetros que necessitam ser escolhidos para a utilização desse método.

Janelas de tempo entre 10 e 15 minutos foram aplicadas nos trabalhos de Vanfretti *et al.* (2011), Prioste (2011) e Pierre (1997). Os testes com os dados do SPMS MedFasee BT comprovam que esse intervalo é adequado. Por se tratar de grandes janelas de tempo, deve-se reduzir a quantidade de fasores por segundo para que se reduza o esforço computacional. Sugere-se uma reamostragem de 10 a 20 fasores/s.

Para executar o método N4SID é necessário definir a ordem do modelo e a dimensão das matrizes de entrada ( $U$ ) e saída ( $Y$ ). As matrizes  $Y$  e  $U$  são divididas em passado e futuro, para tanto é preciso definir o tempo presente. A escolha desse parâmetro, representado por

$k$ , define o número de blocos linha das matrizes de entrada, conforme (4.9).

$$W_p := \begin{bmatrix} U_p \\ Y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{0|k-1} \\ Y_{0|k-1} \end{bmatrix}$$

$$W_f := \begin{bmatrix} U_f \\ Y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{k|2k-1} \\ Y_{k|2k-1} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

O valor de  $k$  deve ser maior que o valor atribuído para a ordem  $n$  do modelo (KATAYAMA, 2004). Resultados satisfatórios são obtidos quando se escolhe  $3n \leq k \leq 4n$ . Nos trabalhos citados, a escolha da ordem variou de 15 a 30 e os testes com os dados reais comprovaram a eficiência desses valores. De acordo com Prioste (2011), ordens entre 15 e 30 são adequadas, pois em regime normal de operação, têm-se no máximo 20 autovalores com energia modal significativamente maior do que zero.

A Tabela 4.7 resume os ajustes dos parâmetros apresentados nessa seção.

Tabela 4.7 – Ajustes para o Método N4SID.

<b>Método N4SID</b>	
Janela	$10 \leq t \leq 15 \text{ min.}$
Ordem do modelo	$15 \leq n \leq 30$
Número de blocos linha	$3n \leq L \leq 4n$
Taxa de Amostragem	$10 \leq f_{\text{amos}} \leq 20 \text{ fadores/s}$

#### 4.10 MÉTODO REALIZAÇÃO BALANCEADA ESTOCÁSTICA

O método RBE (Seção 3.8.3) (KATAYAMA, 2004) envolve uma abordagem estocástica e não necessita de uma modelagem explícita da entrada do sistema ( $u$ ), como feito no método N4SID. Com isso, elimina-se uma fonte de erro e se reduz o tempo de processamento devido às simplificações nos códigos.

Nesse método são válidas as mesmas considerações feitas para o método N4SID, utilizando janelas de tempos de 10 a 15 minutos e uma taxa de amostragem de 10 a 20 fadores/s. Também são válidas as considerações para a montagem da matriz de dados de entrada, que deve

ser feita com dimensão de blocos linha  $k$  entre  $3n$  e  $4n$  e a ordem  $n$  entre 15 e 30.

Em resumo, tem-se a Tabela 4.8 com os ajustes recomendados.

Tabela 4.8 – Ajustes para o Método RBE.

<b>Método RBE</b>	
Janela	$10 \leq t \leq 15 \text{ min.}$
Ordem do modelo	$15 \leq n \leq 30$
Número de blocos linha	$3n \leq k \leq 4n$
Taxa de Amostragem	$10 \leq f_{amos} \leq 20 \text{ fadores/s}$

#### 4.11 MÉTODO WIENER-HOPF

O método Wiener-Hopf foi utilizado por Pierre *et al.* (1997) e aplicado para o processamento de dados ambiente e por este motivo é importante utilizar um tempo grande (10 a 15 min) com amostragem reduzida (10 a 20 fadores/s). Os tempos devem seguir as mesmas definições anteriores, ficando a critério do usuário a escolha da ordem que novamente deverá estar contida num intervalo de 15 a 30.

Dessa forma, a Tabela 4.9 apresenta as recomendações de ajustes dos parâmetros para o método de Wiener-Hopf.

Tabela 4.9 – Ajustes para o método de Wiener-Hopf.

<b>Método Wiener-Hopf</b>	
Janela	$10 \leq t \leq 15 \text{ min.}$
Ordem do modelo	$15 \leq n \leq 30$
Taxa de Amostragem	$10 \leq f_{amos} \leq 20 \text{ fadores/s}$

#### 4.12 SINTESE DOS AJUSTES DE PARÂMETROS

Nesse capítulo, foi descrito um conjunto de recomendações para a adequada utilização dos métodos de identificação de oscilações eletromecânicas utilizando sincrofadores.

Os ajustes apresentados desde a Tabela 4.4 até a Tabela 4.9 estão sintetizados na Tabela 4.10. Com os ajustes de parâmetros apresentados nessa tabela, mitigam-se as principais dificuldades encontradas ao se utilizar as metodologias selecionadas para este trabalho.

Tabela 4.10 – Síntese dos ajustes dos parâmetros.

Métodos Parâmetros	Prony	HTLS	M. Pencil	N4SID	RBE	W. Hopf
Tempo da janela	10-20 s			10-15 min.		
Taxa de amostragem	60 fasores/s			10-20 fasores/s		
Ordem do Modelo	$\frac{N}{4}$	$n = \text{qtde}(\sigma_c)$ , tal que: $\frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} > 10^{-3}$ , $c = 1 \dots \min(L, M)$		15-30		
Dimensão das matrizes	-	$L = \frac{N + 1}{2}$	$M = \left[ \frac{N}{3}; \frac{N}{2} \right]$	$k = [3n; 4n]$		-

Embora as PMUs, por requisitos de norma (IEEE C37.118, 2011), eliminem significativamente os ruídos do sinal no processo de medição, ainda é possível observá-los nos sinais monitorados pelo SPMS. Para auxiliar no processamento dos dados fasoriais, é recomendada a filtragem, principalmente do sinal de frequência, pois, como discutido na seção 2.3.1, a frequência é calculada como sendo a derivada do ângulo, o que faz com que pequenos ruídos no ângulo sejam amplificados na frequência. Os modos de oscilações eletromecânicas são de baixa frequência e encontram-se em uma faixa que varia de 0,1 até 3 Hz (Seção 3.2). Com isso, a utilização de um filtro passa-baixas sintonizado em 5 Hz facilita o processo de identificação das oscilações eletromecânicas.

A consideração de que o sistema elétrico é estacionário durante o período de análise é fundamental para que os métodos forneçam bons resultados. Por isso, é preciso estar atento a evidências de possíveis mudanças significativas de topologia como, degraus, rampas e variações instantâneas de amplitudes nas curvas analisadas. Tais descontinuidades podem indicar mudanças sistêmicas, invalidando a aplicação dos métodos.

### 4.13 VALIDAÇÃO DOS AJUSTES POR SIMULAÇÃO

Para verificar a eficiência das metodologias e recomendações de ajustes apresentados neste trabalho, foram utilizados sinais de simulações de forma a determinar os modos de oscilação previamente definidos.

Para a simulação, realizada em Matlab/Simulink®, definiram-se os valores de frequência e amortecimento que se desejava ter nos modos de oscilação. Posteriormente, calcularam-se os valores de  $\lambda$  para que se obtivessem aquelas características e, por fim, foi determinada uma função de transferência que possuísse os polos ( $\lambda$ ) definidos.

As características dos modos definidos são apresentadas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Modos selecionados.

Frequência	Amortecimento	Polos
0,35 Hz	13%	$-0,1263 \pm i.4,2097$
0,67 Hz	3%	$-0,2883 \pm i.2,1991$

A função de transferência com as características desejadas é apresentada em (4.10).

$$G(s) = \frac{1}{s^4 + 0,8292.s^3 + 22,8.s^2 + 11,47.s + 87,25} \quad (4.10)$$

Com esta função de transferência, montou-se o sistema teste apresentado na Figura 4.11. Este sistema foi utilizado para criar um sinal amostrado a 60 pontos por segundo semelhante a sincrofasores.

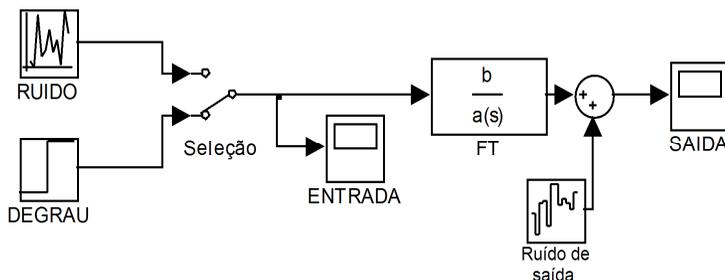


Figura 4.11 – Sistema teste implementado em Matlab/Simulink®.

Para simular dados ambiente, utiliza-se a chave seletora para inserir ruídos na entrada. Para simular dados de *ringdown*, aplica-se na entrada um degrau. A Figura 4.12 ilustra a resposta do sistema a essas entradas.

As características dos modos de oscilação do sistema da Figura 4.11 são conhecidas. Portanto, o objetivo é que os métodos descritos identifiquem os modos de oscilação através da análise do sinal de saída. Para deixar o sinal sintetizado mais próximo da realidade, são inseridos na saída do sistema ruídos de medição.

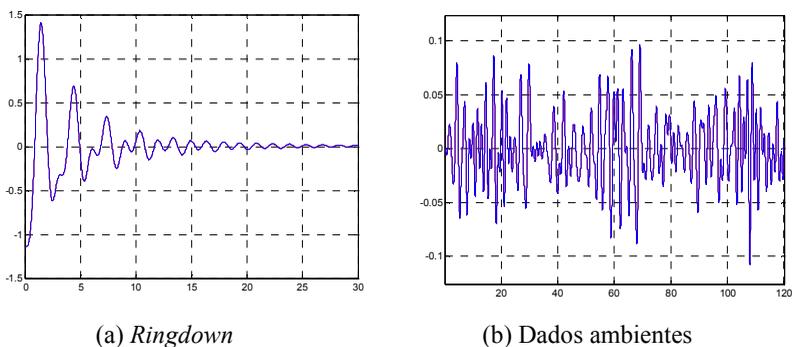


Figura 4.12 – Sinais de saída simulados.

Foram avaliadas três situações diferenciadas pelo nível de ruído. Os ruídos foram inseridos no sinal através da função “*awgn( )*” do Matlab®. A primeira situação considerada é sem ruído, ou seja, relação sinal ruído (SNR – Signal Noise Ratio) igual a 100 dB. A segunda situação com ruído intermediário com SNR = 40 dB e uma situação considerada crítica com SNR = 20 dB. Por fim, são apresentados os resultados da aplicação da filtragem 5 Hz disponível no DFAM, descrito em 2.5.1, na situação em que se têm altos índices de ruídos.

Para a verificação da eficiência dos métodos serão utilizados os valores propostos na Tabela 4.10 que sintetiza os ajustes dos parâmetros. Para os métodos de *ringdown* (DFT, Prony, HTLS e Feixe de Matrizes – F.M.) serão utilizados 20 segundos de dados a 60 amostras/s com um degrau na entrada. Para os métodos de dados ambiente (DFT, N4SID, RBE e Wiener-Hopf – W.H.) serão utilizados 10 minutos de dados a uma taxa de 10 amostras/s. Observa-se que a DFT será utilizada nas duas situações.

Tabela 4.12 – Detecção modo 1: 0,35 Hz – 13%.

		SNR = 100		SNR = 40		SNR = 20		SNR = 20 c/ filtro	
		$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
Ringdown	REAL	<b>0,35</b>	<b>13,0</b>	<b>0,35</b>	<b>13,0</b>	<b>0,35</b>	<b>13,0</b>	<b>0,35</b>	<b>13,0</b>
	DFT	0,35	-	0,35	-	0,35	-	0,35	-
	Prony	0,35	13,0	0,35	13,0	0,35	13,4	0,35	13,3
	HTLS	0,35	13,0	0,35	13,0	0,35	13,1	0,35	12,9
	F. M.	0,35	13,0	0,35	13,0	-	-	0,35	12,3
Ambiente	DFT	0,39	-	0,39	-	0,39	-	0,39	-
	N4SID	0,35	10,2	0,36	9,6	0,35	15,2	0,36	11,9
	RBE	0,35	9,8	0,36	9,9	0,34	7,47	0,35	11,3
	W.H.	0,35	10,7	0,34	13,6	-	-	-	-

Tabela 4.13 – Detecção modo 2: 0,67 Hz – 3%.

		SNR = 100		SNR = 40		SNR = 20		SNR = 20 c/ filtro	
		$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
Ringdown	REAL	<b>0,67</b>	<b>3,0</b>	<b>0,67</b>	<b>3,0</b>	<b>0,67</b>	<b>3,0</b>	<b>0,67</b>	<b>3,0</b>
	DFT	0,65	-	0,65	-	0,65	-	0,65	-
	Prony	0,67	3,0	0,67	3,0	0,67	2,9	0,67	2,9
	HTLS	0,67	3,0	0,67	3,0	0,67	3,0	0,67	2,94
	F. M.	0,67	3,0	0,67	3,0	-	-	0,67	2,52
Ambiente	DFT	0,66	-	0,66	-	0,68	-	0,65	-
	N4SID	0,66	2,6	0,67	3,4	0,65	5,94	0,66	3,3
	RBE	0,67	3,3	0,67	3,5	0,65	3,53	0,67	3,9
	W.H.	0,67	2,7	0,66	5,9	-	-	-	-

É possível notar por essas tabelas que a detecção da frequência dos modos foi feita de maneira bem aproximada por todos os métodos, em qualquer situação. A maior dificuldade é a detecção do valor do amortecimento.

Para os métodos de detecção de oscilações durante o *ringdown*, a precisão dos resultados em termos de amortecimento diminui quando se têm altas taxas de ruído, porém a detecção é feita de maneira correta mesmo nessas situações. Nota-se que somente o método Feixe de Matrizes falhou para SNR=20 dB, o que é uma situação bastante crítica e pouco comum em SPMS. Esse problema foi resolvido com a aplicação de um filtro passa-baixas sintonizado em 5 Hz. Observa-se também nos métodos de *ringdown* que para um SNR=20 dB o modo com pouco amortecimento (3%) foi identificado com maior precisão do que o modo com 13% de amortecimento. Esta característica é um indicativo de que os métodos tendem a ter melhores resultados em situações mais críticas, consideradas como baixo amortecimento.

Para os métodos de identificação de oscilações eletromecânicas a partir de dados ambiente, os resultados também foram satisfatórios. O Método Wiener-Hopf e N4SID não forneceram bons resultados para altas taxas de ruídos, que pode ser solucionado com a utilização de filtros. Outra consideração importante é que, assim como os métodos de *ringdown*, os métodos para processamento de dados ambiente aproximaram melhor os resultados para o modo mais crítico com pouco amortecimento.

#### 4.13.1 Erro ao aplicar métodos para *ringdown* em dados ambiente

Nesta seção ilustra-se o desempenho dos métodos de Prony, HTLS e Feixe de Matrizes quando aplicados a dados ambientes. Pela Tabela 4.14, nota-se que esses métodos, baseados na reconstrução do sinal, falham em dados ambiente.

Tabela 4.14 – Prony, HTLS e Feixe de Matrizes em dados ambiente.

	Dados ambiente			
	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
<b>REAL</b>	<b>0,35</b>	<b>13,0</b>	<b>0,67</b>	<b>3,0</b>
Prony	0,39	1,6	0,70	1,2
HTLS	0,39	-0,4	0,67	-2,1
F. M.	0,38	-0,5	0,68	-1,1

Apesar de encontrarem adequadamente o valor da frequência da oscilação, os métodos baseados na reconstrução de sinal falharam na estimação do amortecimento. Este fato é compreendido analisando a Figura 4.12 (b) em que a reconstrução deste sinal é feita através de senoides pouco amortecidas.

## 4.14 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste capítulo foram discutidas as principais dificuldades encontradas ao se utilizar as metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas apresentadas no capítulo 3. São elas a escolha da largura da janela de dados, da taxa de amostragem dos fasores, da ordem do modelo e da dimensão das matrizes com os dados de entrada.

Diante dessas dificuldades, apresentou-se, sob a forma de um manual prático, um conjunto de recomendações para instruir o usuário no ajuste dos parâmetros dos métodos propostos. Essas recomendações

foram incorporadas ao módulo 5 do DFAM, que sugere ao usuário o valor que deve ser utilizado para esses parâmetros, porém a decisão final será do usuário.



## 5 VALIDAÇÃO DOS DESENVOLVIMENTOS EM DADOS REAIS DO SPMS MEDFASEE BT

Neste capítulo apresentam-se estudos de validação das metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas utilizando dados reais de três perturbações no SIN, obtidos através do SPMS MedFasee BT. A primeira ocorrência, de 10/02/2010, trata-se de uma perturbação que resultou na separação do SIN em três subsistemas. Esse caso é empregado para validar as metodologias de *ringdown*. A segunda ocorrência, de 02/09/2011, trata-se de aberturas de LTs de 500 kV e 765 kV da UHE de Itaipu culminando com a perda de 5.100 MW de geração dessa usina. No segundo caso são exemplificadas situações em que as metodologias não se aplicam devido as não estacionariedades do sistema elétrico. Também com esse caso valida-se o cálculo das formas modais para os métodos de Prony e HTLS multissinais, bem como as metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas a partir de dados ambientes. Por fim, conclui-se este capítulo com um terceiro caso, em que se têm oscilações sustentadas no SIN, monitoradas em Mato Grosso do Sul. Os dados desse evento são utilizados para validar a metodologia da DFT com janelas deslizantes.

### 5.1 UTILIZAÇÃO DO DFAM EM ESTUDOS DE OCORRÊNCIA NO SIN

Os resultados desse capítulo são apresentados em duas etapas. Inicialmente demonstram-se as principais funcionalidades do DFAM para análise de ocorrência, em que se apresentam os principais eventos dos dois primeiros casos. Posteriormente, os dados das ocorrências são utilizados para avaliar as metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas.

#### 5.1.1 Caso 1 – 10/02/2010: Separação do SIN em 3 Subsistemas

Às 14h52min ocorreu a abertura das interligações norte/sudeste, norte/nordeste e sudeste/nordeste, o que fez com que o SIN operasse com três áreas isoladas, ilustrado na Figura 5.1.

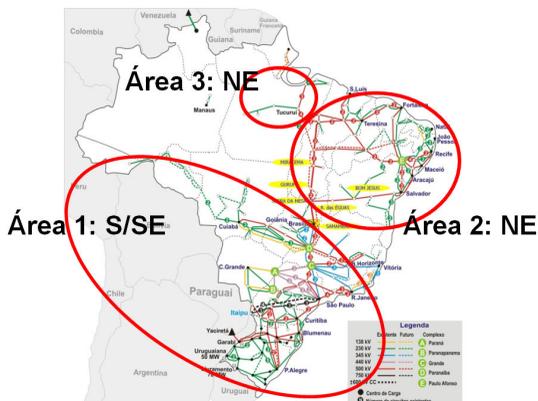


Figura 5.1 – Áreas isoladas do SIN.

Utilizando a funcionalidade de esboço das grandezas fasoriais no tempo é possível acompanhar o comportamento geral do SIN e identificar visualmente alguns eventos. Para isso, utilizam-se os gráficos de frequência (Figura 5.2), em que são observados quatro eventos, listados na Tabela 5.1. O detalhamento de cada um dos eventos é apresentado na Figura 5.11 (Evento 1), Figura 5.14 (Evento 3) e Figura 5.17 (Evento 4).

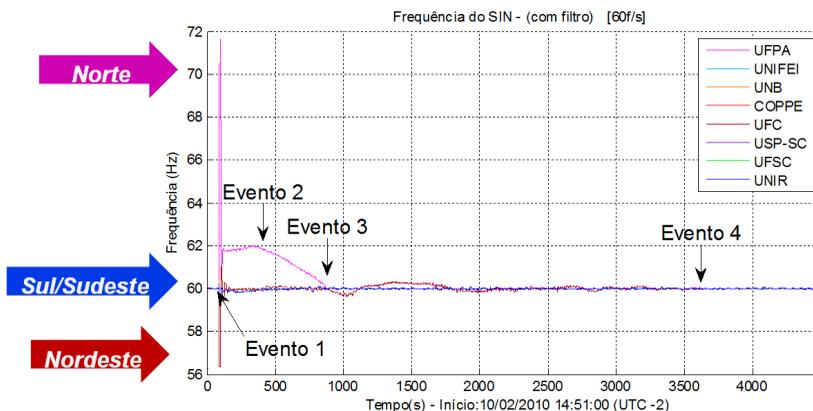


Figura 5.2 – Visão geral da ocorrência em termos de frequência no SIN.

Tabela 5.1 – Eventos observados.

Evento	Tempo	Referência	Provável descrição
1	14:52:27	t0	<i>Separação do SIN em 3 Subsistemas</i>
2	14:56:30	t0 + 4min3s	<i>Ação para reinterligar o norte e nordeste</i>
3	15:05:18	t0 + 12min33s	<i>Reconexão norte/nordeste</i>
4	15:51:11	t0 + 27min52s	<i>Reconexão norte/nordeste – sul/sudeste. Composição do SIN.</i>

Ainda pelas curvas de frequência da Figura 5.2 é possível extrair informações dos valores máximos e mínimos atingidos pela frequência. Na região norte, em que se tem a UHE de Tucuruí, ocorreu uma sobrefrequência com valor de 71,6 Hz resultante do excesso de energia na região. Devido ao ilhamento, a UHE de Tucuruí ficou alimentando somente a carga da região de Belém-PA, o que explica a sobrefrequência.

O contrário ocorreu na ilha da região nordeste, em que a frequência atingiu 56,3 Hz em decorrência do déficit de energia nessa região. A frequência na região sudeste se manteve próxima ao valor nominal com valores mínimos de 59,4 Hz.

Utilizando a ferramenta *zoom*, disponível no Matlab®, obtém-se a Figura 5.3.

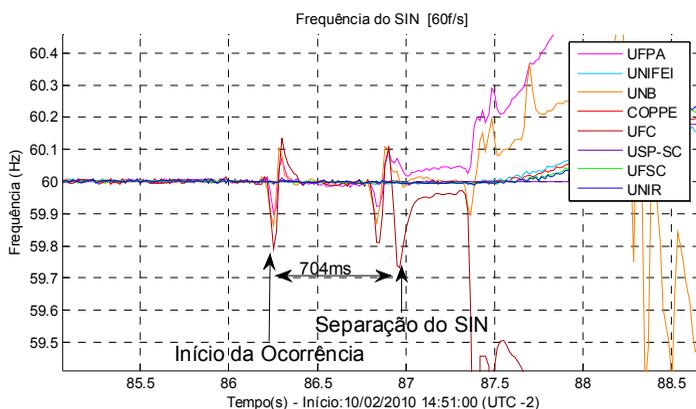


Figura 5.3 – Detalhes do início da ocorrência

Percebe-se que instantes antes da separação do SIN, registra-se um evento refletido como um pico na curva de frequência monitorada nas PMUs da UFPA (Belém-PA), UNB (Brasília-DF) e UFC (Fortaleza-

CE). Desde o início da ocorrência até a atuação do esquema de proteção que isolou o SIN, transcorreram-se aproximadamente 704 ms.

Além das informações relacionadas aos eventos e instantes da ocorrência, é possível ter informações relacionadas ao comportamento das tensões. A Figura 5.4 ilustra as tensões trifásicas monitoradas pela PMU da UnB (Brasília – DF) nos primeiros instantes da ocorrência. Percebe-se que a tensão atingiu valores abaixo de 0,5 pu, o que indica que a causa do problema pode ter sido um curto-circuito nessa região.

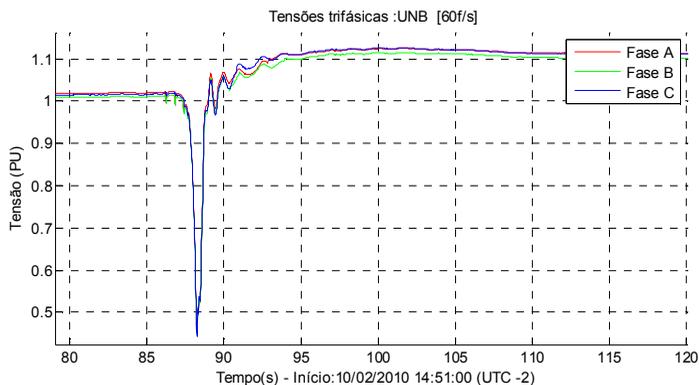


Figura 5.4 – Tensões trifásicas na UnB (Brasília – DF).

Essa ocorrência foi selecionada por possuir características adequadas para o processamento dos métodos de identificação de oscilações em *ringdown*. Essas análises foram feitas na Seção 5.2.

### 5.1.2 Caso 2 - 02/09/2011: Desligamento de LTs da UHE de Itaipú

De acordo com o Informativo Preliminar Diário da Operação – IPDO (ONS, 2011), do dia 02/09/2011:

*“Às 16h43min (ou 19h43min UTC) ocorreu o desligamento automático das LT 765 kV Foz/Ivaiporã C2 e C3 (Furnas), das LTs 500 kV Itaipu/Foz do Iguaçu C1, C2, C3 e C4 (Furnas) e rejeição de aproximadamente 5.100 MW da UH Itaipu 60Hz. Houve explosão da bucha da fase ‘b’ do reator de linha da LT 765 kV Foz do*

*Iguaçu/Ivaiporã C3 em Foz do Iguaçu. Houve a interrupção de 2.566 MW de cargas por atuação, em sua maioria, de parte do primeiro estágio do Esquema Regional de Alívio de Cargas - ERAC nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, e nos estados do Acre e Rondônia. A frequência atingiu um valor de 58,4Hz.*

*A recomposição do sistema ocorreu da seguinte forma:*

*16:59h - Desligamento da LT 765kV Foz do Iguaçu/Ivaiporã C1 (permaneceu ligada a vazio);*  
*17:01h - Religamento de duas LT 500kV Itaipú/Foz do Iguaçu;*  
*17:04h - Sincronizada U17 de Itaipu 60Hz;*  
*17:05h - Sincronizada U13 de Itaipu 60Hz;*  
*17:07h - Sincronizada U18A de Itaipu 60Hz;*  
*17:11h - Religamento da LT 765kV Foz do Iguaçu/Ivaiporã C2 (entrada de Itaipu no SIN);*  
*17:18h - Religamento da LT 765kV Foz do Iguaçu/Ivaiporã C1;"*

### ***Visão geral da frequência no SIN e eventos***

O comportamento do SIN durante essa ocorrência pode ser observado através do gráfico de frequência da Figura 5.5. Essa figura ilustra um período de 2 horas (19 às 21h UTC), no qual se teve a saída e o retorno da UHE de Itaipu, com uma taxa de amostragem de 10 fasores/s.

Na Figura 5.5 nota-se que a frequência no SIN atingiu valores de 58,4 Hz e que a PMU da UNIR monitorou uma frequência ainda menor de 58,2 Hz. Percebe-se também que o retorno da UHE de Itaipu ao SIN foi feito após 27 minutos e o sistema operou em subfrequência por um período de cerca de 10 minutos. Uma das causas de subfrequência em um sistema elétrico pode ocorrer por falta de geração. Nesse caso a saída da UHE de Itaipu retirou 5.100 MW de geração, sendo a principal causa desse problema. A falta de reserva girante e a possível saída de

outras unidades geradoras por subfrequência podem ter contribuído para a operação do SIN nessa condição.

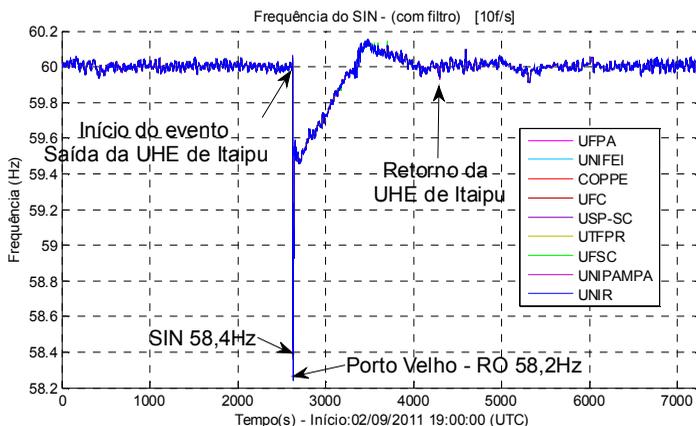


Figura 5.5 – Frequência no SIN.

Além de permitir uma visão generalizada de ocorrências, utiliza-se o DFAM para análises mais específicas. Assim, utilizando a taxa de amostragem de 60 fasores/s é possível identificar com precisão de até 16 ms a sequência de eventos registradas pelo ONS. Esta precisão é obtida devido ao período da amostragem (1/60) do SPMS MedFasee BT. Por meio da Figura 5.6 e da Figura 5.7, identificam-se quatro eventos relevantes, descritos na Tabela 5.2.

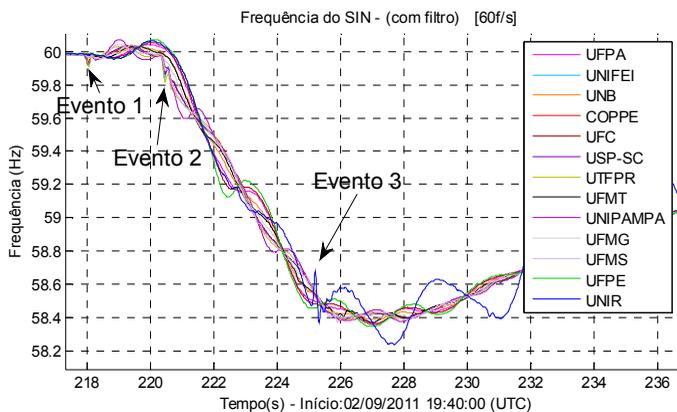


Figura 5.6 – Eventos 1 a 3.

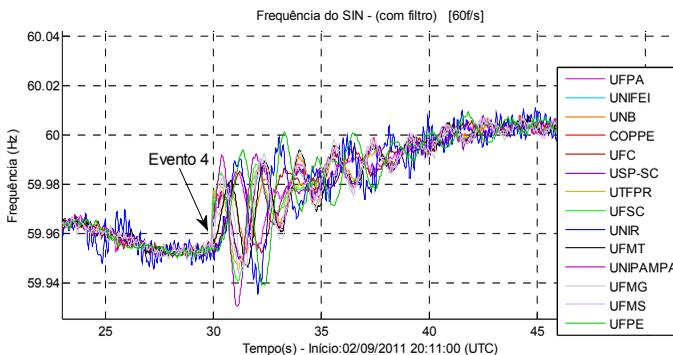


Figura 5.7 – Evento 4.

Tabela 5.2 – Eventos notados.

Evento	Tempo	Referência	Provável descrição
1	19:43:37,933	$t_0$	<i>Explosão da Bucha do reator</i>
2	19:43:40,350	$t_0 + 2,417s$	<i>Rejeição de 5.100 MW da UH Itaipu</i>
3	19:43:45,083	$t_0 + 7,15s$	<i>Atuação do ERAC Rondônia</i>
4	20:11:29,880	$t_0 + 27min52s$	<i>Religamento da LT 765kV Foz do Iguaçu/Ivaiporã C2 (entrada de Itaipu no SIN)</i>

O ajuste do Esquema Regional de Alívio de Carga – ERAC dos estados do Acre e Rondônia é mostrado na Tabela 5.3. Com isso, conclui-se que o evento 3 é a atuação do 1º Estágio do ERAC que ocorre com um retardo de 176ms, valor esse dentro do programado, que é de até 350ms (ONS, 2009). Pela Figura 5.6, percebe-se que após a atuação do ERAC surgem oscilações na frequência medida pela PMU da UNIR (Porto Velho – RO), que será analisada nos tópicos seguintes.

Tabela 5.3 – Ajustes do ERAC AC/RO.

Estágio	Ajuste (Hz)	Carga rejeitada (%)
1º	58,5	15
2º	58,2	10
3º	57,9	10
4º	57,7	10
5º	57,5	10

Fonte: SEP (ONS, 2009).

O Evento 4 é caracterizado pelo retorno da UHE de Itaipu através do fechamento da LT 765kV Foz do Iguaçu/Ivaiporã. Nota-se que com o fechamento dessa linha surgem oscilações no sinal de frequência que são analisadas nos itens seguintes.

### *Visualização das curvas de tensão e defasagem angular*

Na Figura 5.8 estão esboçados os gráficos de tensão de sequência positiva. O que se percebe é que as tensões na rede de distribuição, embora tenham sofrido efeitos da ocorrência, mantiveram-se dentro dos limites adequados de 0,95 a 1,05 pu (PRODIST – Módulo 8) (ANEEL, 2012). Porém, a PMU da UNIR em Porto Velho – RO (azul) registrou que antes do evento a tensão era inferior a 0,95 pu.

Durante o evento a tensão monitorada pela PMU da UNIR atingiu valores extremos de 0,65 pu, porém a provável atuação dos reguladores de tensão da distribuição a reestabeleceram para um nível adequado. Em geral, o subsistema Acre/Rondônia sofre os maiores impactos das ocorrências no SIN, devido à natureza da interligação radial com linhas longas de 230 kV.

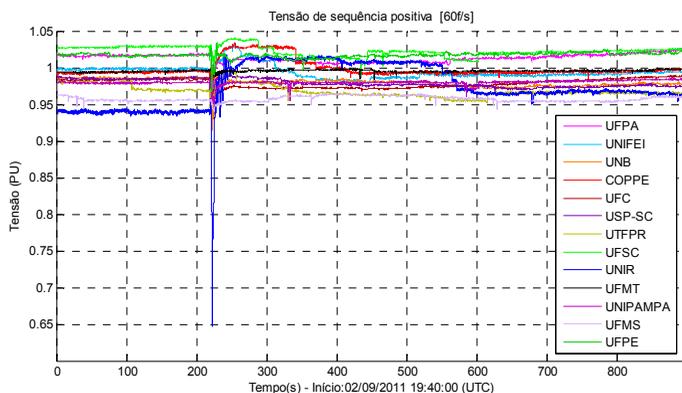


Figura 5.8 – Tensões de sequência positiva.

A partir de gráficos de diferenças angulares, como na Figura 5.9 em que se utiliza a PMU da UFSC (Florianópolis – SC) como referência, é possível observar a propagação do evento para todo o SIN. Neste gráfico visualizam-se oscilações eletromecânicas que serão avaliadas nos itens seguintes.

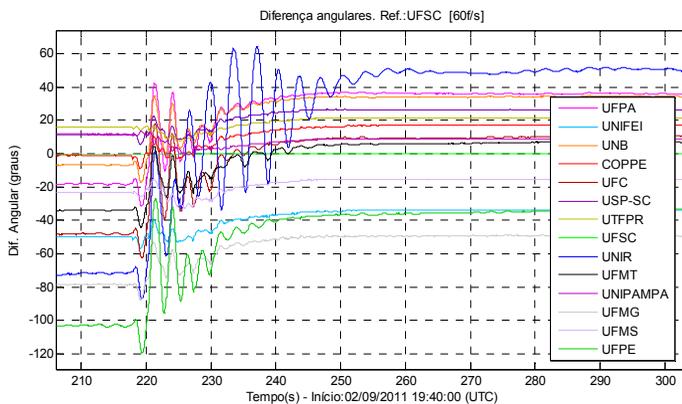


Figura 5.9 – Diferenças angulares. Referência; UFSC (Florianópolis-SC).

Outra vantagem proporcionada pelo DFAM nesse tipo de análise é a rapidez e a clareza com que as informações são obtidas. Utilizando o DFAM, gráficos como esses são obtidos em um tempo relativamente curto. Considerando o tempo de busca e de carregamento dos dados para o padrão DFAM, é possível obter registros de ocorrências em menos de 10 minutos após a verificação de um evento no SIN.

As análises complementares dessa ocorrência, em termos de oscilações eletromecânicas, são apresentadas no item seguinte, em que esses dados são utilizados para validar as metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas, tanto para *ringdown* quanto para dados ambientes.

## 5.2 VALIDAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE IDENTIFICAÇÃO DE OSCILAÇÕES ELETROMECÂNCIAS

Nesta seção utiliza-se o DFAM para validar as metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas a partir de sincrofasores reais do SIN, medidos pelo SPMS MedFasee BT. Ao se utilizar os dados reais, não se tem informações a respeito do valor verdadeiro dos modos existentes. Porém, têm-se faixas de valores conhecidas para o SIN que foram apresentadas na Tabela 3.3 e reproduzidas na Tabela 5.4 seguinte.

Tabela 5.4 – Modos Interárea no SIN

Áreas	Frequência [Hz]
Norte x Sul	0,2 – 0,4
Sul x Sudeste	0,6 – 0,8

Norte x Nordeste	0,55 – 0,65
Rio de Janeiro x SIN	1,10 – 1,30
Mato Grosso x SIN	0,40 – 0,45
São Paulo x SIN	0,65 – 0,75

O conjunto de dados escolhidos são os mesmos das ocorrências descritas nos casos 1 e 2 da Seção 5.1. O caso 1 descreveu a separação do SIN em três subsistemas e o caso 2 descreveu um evento que culminou na perda de 5.100 MW da UHE de Itaipu. O terceiro caso abordado são as oscilações sustentadas monitoradas na região do Mato Grosso do Sul. As análises seguintes contemplam a avaliação dos métodos para o processamento de dados de *ringdown* e dados ambientes, respectivamente.

### 5.2.1 Validação dos Métodos para Ringdown

De acordo com o fluxograma da Figura 4.4, aplicam-se em *ringdown* as metodologias baseadas na reconstrução do sinal (Prony, HTLS e Feixe de Matrizes) e aquelas baseadas na decomposição espectral (DFT).

#### A) Avaliação das metodologias de *ringdown* para o caso 1

No primeiro caso, o SIN foi separado em três subsistemas. Desta forma, torna-se um caso interessante para identificar os modos interáreas nos instantes da separação e durante as recomposições.

Retomando a visão geral deste evento, tem-se a Figura 5.10 que mostra os instantes da separação e das recomposições.

#### *Separação do SIN*

Durante a separação do SIN, os subsistemas sul, sudeste e centro-oeste permaneceram interligados. Pela Figura 5.11, que detalha o início da ocorrência, percebe-se que o sinal de frequência monitorada pela PMU do sul (UFSC) oscila em oposição de fase as frequências monitoradas nas PMUs do sudeste/centro-oeste (USPSC – SP, COPPE – RJ, UNIFEI – MG, UnB – DF). Esta característica é um primeiro indicativo de que se tem o modo sul-sudeste excitado.

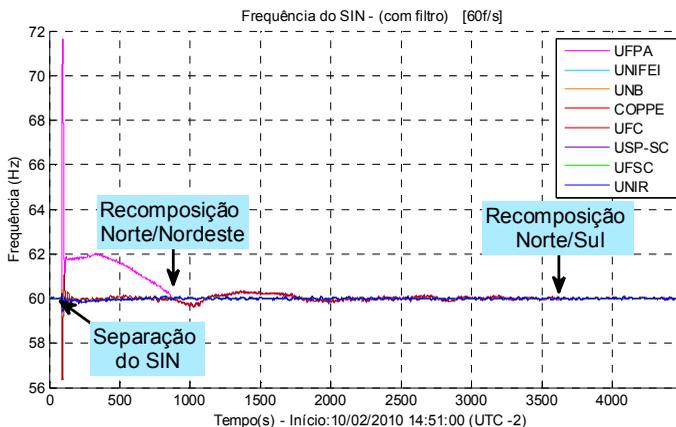


Figura 5.10 – Separação do SIN e recomposições.

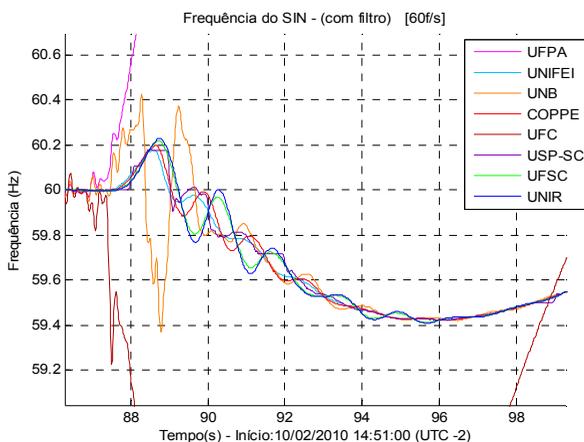


Figura 5.11 – Oscilações no sul, sudeste e centro-oeste.

Aplicando a DFT no sinal de frequência no intervalo de tempo de 88 a 98 s, tem-se o espectro de frequências apresentado na Figura 5.12 que evidencia uma componente de frequência em torno de 0,65 Hz. De acordo com a Tabela 5.4, essa frequência se encontra dentro da faixa de oscilação do modo sul-sudeste.

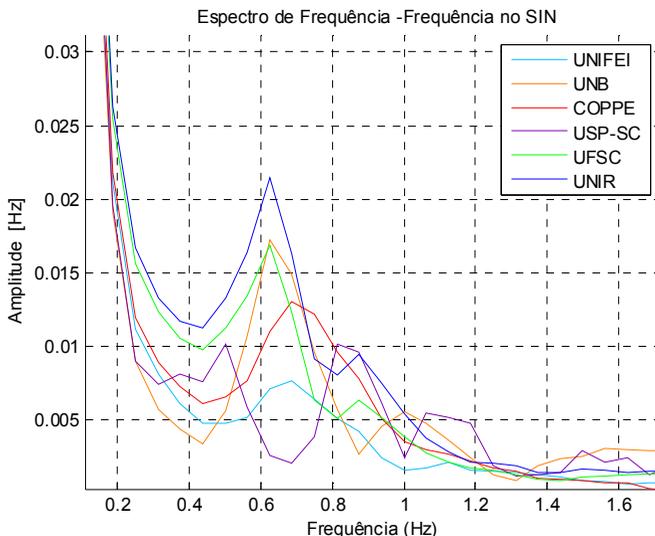


Figura 5.12 – Espectro de frequências. Janela 88 a 98 s.

Aplicando os métodos de Prony, HTLS e Feixe de Matrizes nessa mesma janela, obtêm-se os resultados da Tabela 5.5. Para os métodos da DFT e Feixe de Matrizes, que são monossinais, utilizou-se o resultado encontrado para o sinal de frequência na UFSC, e para os métodos de Prony e HTLS fez-se o processamento multissinais. De maneira geral, percebe-se que a frequência da oscilação é de aproximadamente 0,65 Hz com amortecimento médio de 9,35%.

Tabela 5.5 – Oscilação no sul, sudeste e centro-oeste.

Sinal de frequência		
Método	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
DFT	0,65	-
Prony	0,65	9,25
HTLS	0,64	9,63
F. Matriz	0,64	9,19

Com os métodos de Prony e HTLS é possível esboçar as formas modais (Figura 5.13), em que se observa a oposição de fase entre o sinal monitorado pela PMU da UFSC (sul) e pelas demais (sudeste e centro-oeste). A fase da oscilação monitorada pela UNIR (Porto Velho – RO) acompanha a fase monitorada pela PMU da UFSC (Florianópolis – SC).

Porém, devido à radialidade da interligação Acre/Rondônia – SIN, a fase desta oscilação não traz informações sistêmicas relevantes.

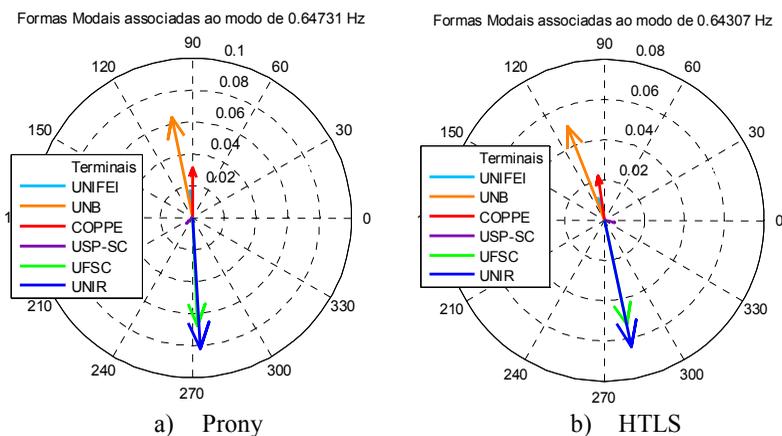


Figura 5.13 – Formas modais para o modo de 0,64 Hz.

Por meio dessa análise, constatou-se a coerência dos resultados obtidos pelas quatro metodologias (DFT, Prony, HTLS e Feixe de Matrizes), que encontraram resultados semelhantes e em concordância com a Tabela 5.4.

### ***Reconexão norte-nordeste***

A segunda avaliação das metodologias foi feita para a reconexão do subsistema norte com o subsistema nordeste.

A Figura 5.14 apresenta a oscilação que surge na região norte-nordeste em consequência da reconexão desses dois subsistemas. Nota-se por essa figura a oposição de fase entre os sinais medidos na região norte (UFPA – PA) e região nordeste (UFC – CE). Utilizando o conceito básico de cálculo de frequência, em que frequência é o inverso do período, constata-se que o período é de 2,08 s, logo, a frequência é de 0,48 Hz.

Aplicando a DFT no sinal de frequência, considerando o intervalo de tempo de 860 a 872, tem-se o espectro de frequência da Figura 5.15 que evidencia uma componente de frequência em torno de 0,5 Hz.

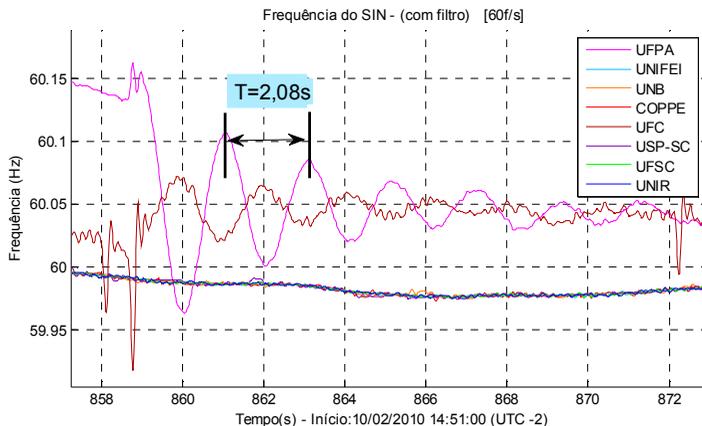


Figura 5.14 – Oscilação no norte e nordeste.

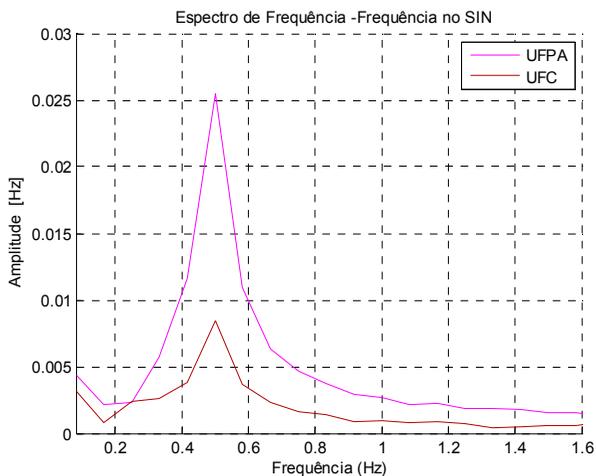


Figura 5.15 – Espectro de frequências. Janela 860 a 872 s.

Aplicando os métodos de Prony, HTLS e Feixe de Matrizes na mesma janela (860 a 872s), obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 5.6. Para os métodos da DFT e Feixe de Matrizes foram utilizados os sinais da UFPA e UFC individualmente, já que o processamento destes métodos é monossinal, para os métodos de Prony e HTLS fez-se o processamento multissinais. De maneira geral, constata-se que a oscilação está próxima a 0,49 Hz com amortecimento médio de 8,6%.

Tabela 5.6 – Oscilação no norte e nordeste.

Sinal de frequência		
Métodos	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
DFT	0,50	-
Prony	0,48	8,63
HTLS	0,49	9,25
F. Matriz (UFPA)	0,49	8,18
F. Matriz (UFC)	0,49	8,52

A Figura 5.16 apresenta as formas modais, determinadas pelos métodos de Prony (a) e HTLS (b) para o modo de 0,49 Hz. Nota-se por essa figura a coerência entre os resultados, pois ambos os métodos indicaram que a oscilação de 0,49 Hz é da região norte contra a região nordeste, sendo que na região norte (UFPA) a amplitude é maior.

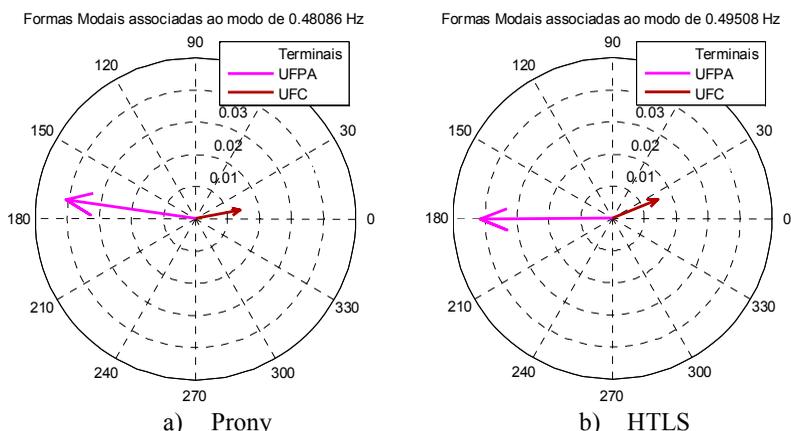


Figura 5.16 – Formas modais para o modo de 0,49 Hz.

A Tabela 5.4 indica que o modo norte-nordeste está na faixa de 0,55 a 0,65 Hz. Porém, essa análise deixou claro que o modo se manifestou com uma frequência de 0,49 Hz, uma vez que a rede elétrica estava isolada. A Tabela 5.4 fornece apenas um indicativo dos valores  $e$ , além disto, neste caso tem-se uma operação dos subsistemas norte e nordeste isolados, sem a interferência do restante do SIN.

### Reconexão norte-sul

A terceira análise realizada utilizando dados do caso 1 consiste em validar as metodologias para identificação de oscilações em *ringdown* no instante da reconexão dos subsistemas norte/nordeste com os subsistemas sul/sudeste/centro-oeste, através do fechamento da interligação norte-sul (LT 500 kV Serra da Mesa – Samambaia).

No instante do fechamento desta interligação, surgem oscilações entre o subsistema norte/nordeste com o subsistema sul/sudeste/centro-oeste. Por questões práticas, é utilizada apenas a terminologia “interligação norte-sul”. A Figura 5.17 apresenta as oscilações que surgem na frequência do SIN em consequência desta interligação. Percebe-se neste gráfico que as PMUs da UFPA e UFC, localizadas nos subsistemas norte e nordeste respectivamente, oscilam em oposição de fase ao restante do SIN (sul, sudeste e centro-oeste). Percebe-se ainda que o período da oscilação é de aproximadamente 4,4 s o que resulta em uma frequência de aproximadamente 0,23 Hz.

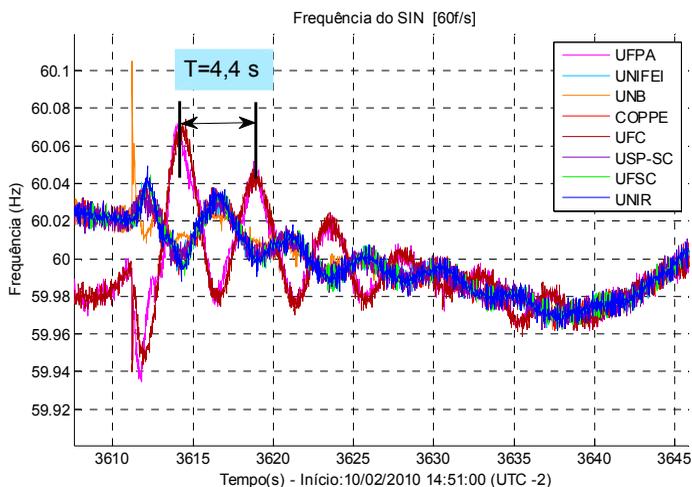


Figura 5.17 – Oscilações no norte e sul.

Aplicando a DFT no sinal de frequência, considerando o intervalo do segundo 3612 ao segundo 3640, tem-se o espectro de frequências da Figura 5.18 que evidencia uma componente de frequência em torno de 0,21 Hz. Esse valor está coerente com o período da oscilação, indicado pela Figura 5.17.

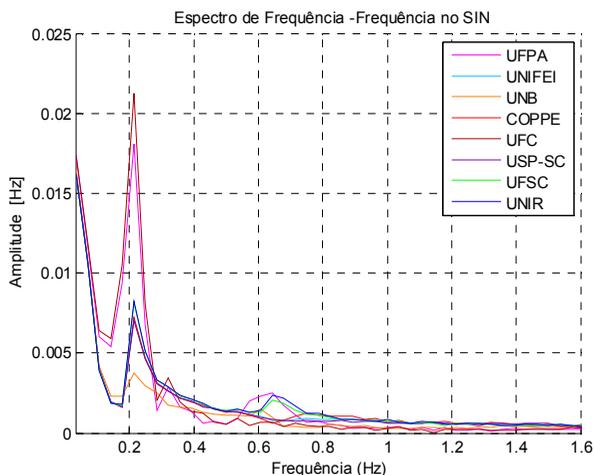


Figura 5.18 – DFT. Janela 3612 a 3640.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados encontrados pelos métodos de Prony, HTLS e Feixe de Matrizes. Observa-se a aderência dos resultados encontrados pelos métodos que indicam que a oscilação possui cerca de 0,22 Hz e amortecimento médio de 7,25%.

Tabela 5.7 – Oscilação no norte e sul.

Sinal de frequência		
Métodos	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
DFT	0,21	-
Prony	0,22	6,71
HTLS	0,22	7,33
F. Matriz (UFPA)	0,21	7,73

A Figura 5.19 apresenta o resultado das formas modais calculadas pelos métodos de Prony (a) e HTLS (b) e indicam que se trata do modo norte-sul.

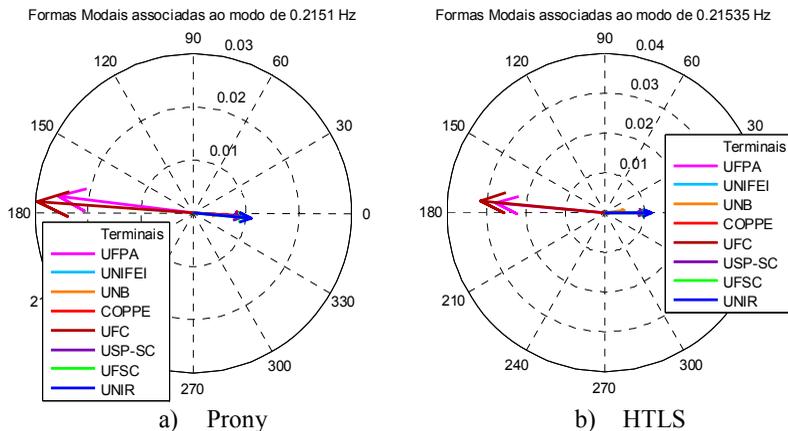


Figura 5.19 – Formas modais para o modo de 0,22 Hz.

### Síntese dos resultados

Para este primeiro caso, apresenta-se na Tabela 5.8 a síntese dos resultados encontrados. Embora não se tenha conhecimento preciso do valor real do modo, percebe-se a coerência dos resultados encontrados pelas metodologias de identificação de oscilações a partir de dados de *ringdown*. Destacam-se os resultados satisfatórios encontrados pelo método de Prony e HTLS em termos do valor da frequência, amortecimento e formas modais.

Tabela 5.8 – Resumo dos resultados.

Métodos	Modo S/SE		Modo N/NE		Modo N/S	
	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
DFT	0,65	-	0,50	-	0,21	-
Prony	0,65	9,25	0,48	8,63	0,22	6,71
HTLS	0,64	9,63	0,49	9,25	0,22	7,33
F. Matriz (UFPA)	0,64	9,19	0,49	8,18	0,21	7,73

Outro critério a se avaliar é o tempo de processamento. O método de Prony exigiu menor esforço computacional quando comparado ao método HTLS. O método Feixe de Matrizes possui a desvantagem de não realizar o processamento de múltiplos sinais simultaneamente, por consequência não fornece as formas modais.

Contudo, estão disponibilizados no DFAM os três métodos que permitem identificar com bastante clareza de informação os modos de oscilações eletromecânicas em sinais de *ringdown*.

## B) Avaliação das metodologias *ringdown* para o caso 2

Para concluir os conceitos envolvendo análise em *ringdown* são utilizados os dados do segundo caso, que envolveu a UHE de Itaipu com perda de 5.100 MW. A descrição deste evento foi apresentada na Seção 5.1.2.

Nessa avaliação, os métodos são aplicados levando em consideração a não estacionariedade do sistema elétrico. Ou seja, durante uma perturbação diversos mecanismos de proteção atuam de forma a manter a estabilidade e integridade do sistema elétrico. Com isto, uma modelagem precisa do sistema elétrico necessitaria de modelos não lineares e variantes no tempo. Portanto, para que seja possível aplicar as metodologias abordadas nesse trabalho, é preciso selecionar os intervalos de tempo adequados que não possuam descontinuidades claramente notadas nos sinais.

As primeiras análises foram feitas no período em que a UHE de Itaipu foi desconectada do sistema elétrico. A consequência da saída da UHE de Itaipu na frequência do SIN é apresentada na Figura 5.20. Nota-se por essa figura que a perturbação excitou diversos modos de oscilações eletromecânicas no SIN.

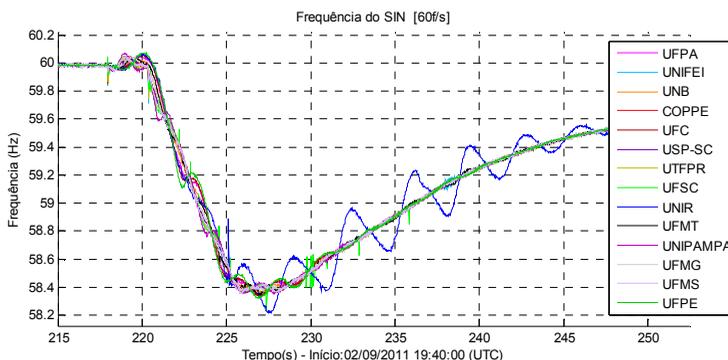


Figura 5.20 – Oscilações no SIN (Ocorrência).

### *Aplicação incorreta das metodologias*

Na Seção 4.13.1 foi ilustrada a não aplicabilidade dos métodos baseados na reconstrução do sinal (Prony, HTLS e Feixe de Matrizes) em dados ambientes, uma vez que esses métodos não levam em consideração que em dados ambientes o sistema é constantemente perturbado.

Na presente seção, a não aplicabilidade das metodologias é descrita em termos da não estacionariedade dos sistemas elétricos. Portanto, é preciso que o sistema esteja em uma condição estacionária para que seja possível identificar com precisão os modos de oscilação. Uma forma de analisar a estacionariedade do sistema é através da curva de diferença angular entre PMUs, pois a diferença angular está diretamente associada aos intercâmbios de potência (Seção 3.4), que por sua vez refletem a topologia do SIN.

A Figura 5.21 mostra a diferença entre os ângulos de tensão monitorados pela PMU da USP-SC (São Carlos – SP) e da UFC (Fortaleza – CE). Neste gráfico ficam evidenciados 4 pontos em que se percebe uma mudança na tendência da curva, indicando uma possível mudança significativa de topologia. Este comportamento é esperado, pois se trata de um período em que os sistemas de proteção estão atuando para assegurar a continuidade e qualidade do fornecimento da energia.

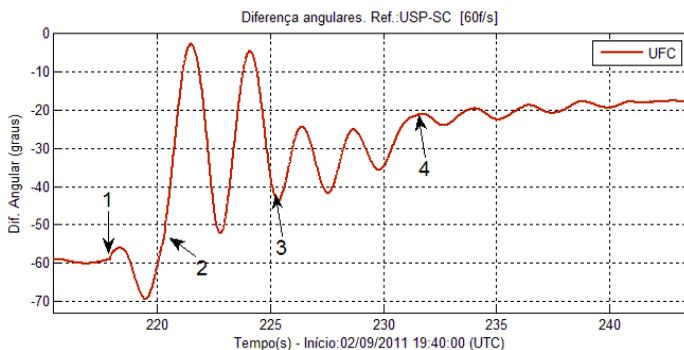


Figura 5.21 – Observação da estacionariedade.

Para aplicar as metodologias é necessário que o sistema elétrico esteja respondendo livremente. Neste caso considera-se que isto ocorre somente após o ponto 4. Porém, após este período as oscilações já estão bem amortecidas, o que dificulta a aplicação dos métodos.

Para ilustrar um possível erro ao se utilizar as metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas, são utilizados os métodos em diferentes janelas de tempo dentro do intervalo apresentado na Figura 5.21. Nessa análise não é tomado o cuidado com os intervalos de estacionariedade, obtendo-se os resultados da Tabela 5.9. Nessa tabela, percebe-se uma grande diferença entre os métodos e ainda diferenças para um mesmo método quando alterado o intervalo. Isto ocorre pela não estacionariedade do sistema elétrico. Pode-se notar na Figura 5.21 que o intervalo de 221 a 231 tem-se uma mudança significativa de topologia, sinalizada pelo índice 3. O mesmo ocorre para os outros intervalos incorretamente escolhidos para a análise.

Tabela 5.9 – Aplicação incorreta dos métodos.

Métodos	217-227		221-231		227-240	
	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
Prony	0,39	4,8	0,41	6,3	0,37	12,8
HTLS	0,32	5,8	0,43	7,8	0,38	29,6
F. Matriz (UFPA)	0,32	6,3	0,44	5,4	0,44	18,7

Com isto, fica demonstrada a necessidade de estar atento aos períodos nos quais se aplicam os métodos, levando sempre em consideração a estacionariedade do sistema elétrico.

### *Identificação por diferentes sinais*

Continuando a análise das metodologias, observa-se pela Figura 5.20 que no instante 225 s, ocorre a atuação do ERAC na região do subsistema Acre/Rondônia ocasionando oscilações de frequência. Para identificar a característica desse modo de oscilação é preciso analisar a estacionariedade do sistema elétrico nessa região. Dessa forma, utiliza-se a diferença angular da tensão de sequência positiva monitorada nas PMUs da UFMT (Cuiabá – MT) e UNIR (Porto Velho) apresentada na Figura 5.22. Nota-se que após a atuação do ERAC (225 s) a oscilação é crescente e a partir do instante 237 s ela começa a ter um decaimento exponencial. Dessa forma, o período considerado será de 237 a 263 s.

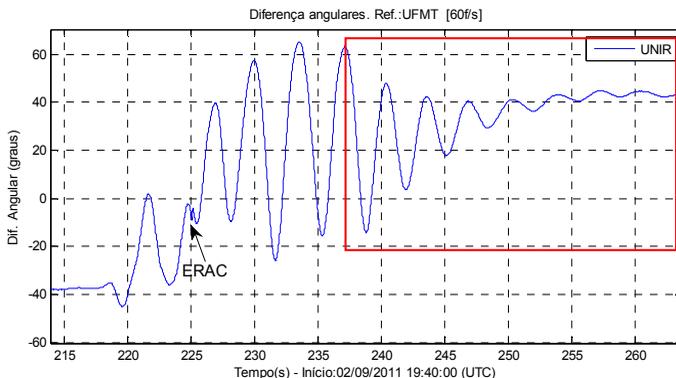


Figura 5.22 – Diferença angular UNIR x UFMT.

A identificação das oscilações eletromecânicas medidas nessa região é realizada utilizando os sinais de frequência, de diferença angular UNIR x UFMT e de tensão de sequência positiva medidos pela PMU da UNIR (Porto Velho – RO).

Os resultados encontrados são apresentados na Figura 5.10.

Tabela 5.10 – Oscilação no Subsistema AC/RO.

Sinal	Frequência		Dif. Angular		Tensão Seq.+		
	Métodos	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
DFT		0,31	-	0,31	-	0,31	-
Prony		0,30	6,90	0,29	7,28	0,29	10,46
HTLS		0,30	6,95	0,30	7,66	0,29	8,94
F. Matriz		0,30	7,24	0,30	7,43	0,29	8,73

Os ajustes dos métodos utilizados para essa análise seguem os valores descritos na Tabela 4.10. Nota-se a coerência dos resultados para os métodos aplicados em diferentes sinais, principalmente entre frequência e diferença angular. Os valores de amortecimento encontrados para o sinal de tensão de sequência são mais otimistas do que os encontrados no sinal de frequência e diferença angular. Porém, por se tratar de uma medição em baixa tensão, a amplitude destas oscilações acaba sendo controlada por diversos equipamentos reguladores da rede de distribuição. Por isso, os resultados para análise sistêmica são mais precisos nos sinais de diferença angular e frequência, concluído que se trata de um modo de 0,3 Hz com aproximadamente 7% de amortecimento. De acordo com Liu *et al.* (2009), trata-se de um

ponto seguro de operação por ser uma modo com mais de 5% de amortecimento.

### ***Retorno de Itaipu: Formas modais***

O retorno da UHE de Itaipu ao SIN, foi feito através do fechamento do circuito 2 da LT 765kV Foz do Iguaçu/Ivaiporã C2. Nesse instante, por ser uma operação planejada, supõe-se que os esquemas de proteção não alteram demasiadamente a configuração do sistema elétrico, criando apenas uma resposta livre a um degrau de geração.

A Figura 5.23 apresenta a curva de frequência no SIN durante o período de reinserção da UHE de Itaipu. Nessa figura, apresenta-se apenas uma PMU por região para que a visualização das oscilações fiquem mais claras. Nota-se pelas oscilações contidas nesse sinal que diversos modos de oscilação foram excitados.

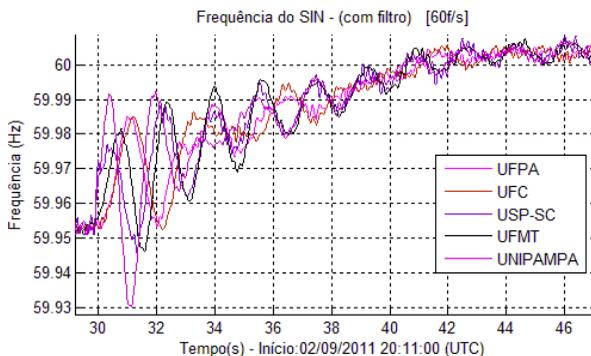


Figura 5.23 – Frequência no SIN (um terminal por região).

A Figura 5.24 apresenta o espectro de frequências calculado pela DFT para o intervalo de 30 a 46s, em que se observa a presença de componentes em 0,35 Hz e 0,58 Hz. A frequência de 0,35 Hz está na faixa do modo de oscilação norte-sul (Tabela 3.3) e a oscilação de 0,58 Hz está na faixa das oscilações norte-nordeste, mas nota-se que todo o sistema elétrico foi afetado por essa oscilação. No entanto, para afirmar que se trata de oscilações interáreas é necessária a utilização das formas modais (*mode-shapes*), calculadas pelos métodos de Prony e HTLS.

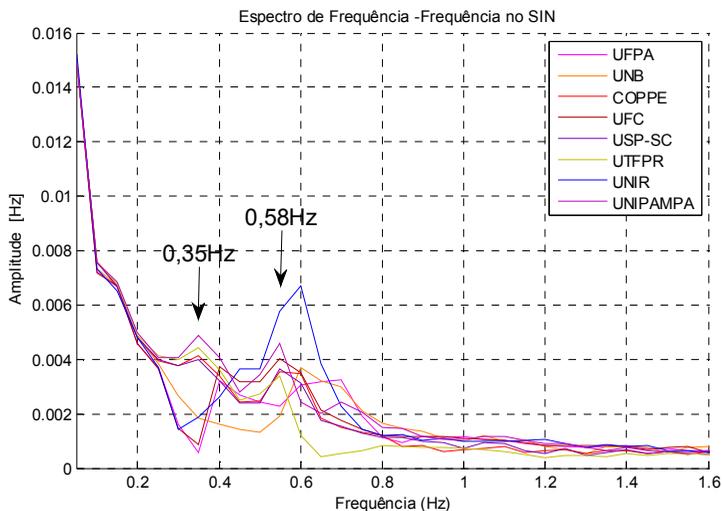


Figura 5.24 – Espectro de frequências.

Aplicando os métodos de Prony e HTLS multissinais nas medidas de frequência no SIN, apresentam-se os resultados na Tabela 5.11. Percebe-se por este resultado que os métodos detectaram também a presença de uma oscilação em torno de 0,7 Hz, dentro da faixa do modo sul-sudeste, que na DFT apareceu com pouca evidência.

Tabela 5.11 – Frequências e amortecimento no religamento de Itaipu.

Métodos	Modo 1: N-S		Modo 2: S-SE		Modo 3	
	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
DFT	0,35	-	-	-	0,58	-
Prony	0,37	11,2	0,71	10,9	0,58	4,5
HTLS	0,38	9,7	0,70	10,6	0,57	4,0

Para se aplicar o método Feixe de Matrizes é preciso avaliar os sinais individualmente, pois a formulação proposta só permite avaliações monossinais. Assim, tem-se a Tabela 5.12 com os valores de frequência e amortecimento para os modos.

Tabela 5.12 – Análise via Método Feixe de Matrizes

PMU	Modo 1: N-S		Modo 2: S-SE		Modo 3:	
	$f$ [Hz]	$\xi$ %	$f$ [Hz]	$\xi$ %	$f$ [Hz]	$\xi$ %
UFC	0,38	9,6	-	-	0,58	3,3
UFPE	0,37	9,8	-	-	0,58	3,6
USPSC	0,36	12,1	0,69	6,7	0,58	3,7
UFSC	0,37	11,1	0,71	9,9	0,57	4,5
Unipampa	0,37	10,6	0,70	11,8	0,57	3,6

### *Validação das formas modais (mode shapes)*

Um dos principais recursos disponíveis no DFAM para a realização de estudos de oscilações eletromecânicas é o esboço das formas modais, utilizando os métodos de Prony e HTLS multissinais que permitem identificar oscilações interáreas no SIN. Para validar essa metodologia foi utilizado um filtro passa-faixa sintonizado na frequência determinada pelos métodos. Assim, o filtro mantém no sinal apenas as componentes de interesse, permitindo identificar as regiões que oscilam em oposição de fase.

O modo 1 possui aproximadamente 0,36 Hz e está na faixa de oscilação do modo norte-sul. A Figura 5.25 apresenta o resultado dos métodos de Prony e HTLS para identificar as formas modais. Essa figura confirma a hipótese de que se trata do modo norte-sul, pois os sinais de frequência medidos pelas PMUs da região norte/nordeste (UFPA, UFC e UFPE) estão com fase oposta aos terminais da região sul/sudeste/centro-oeste (UnB, UTFPR, Unipampa, UFMS, UNIFEI, COOPE, USPSC, UFSC e UFMG).

Para validar as formas modais, aplica-se no sinal de frequência uma filtragem passa-faixas sintonizada entre 0,3 e 0,4 Hz, resultando na Figura 5.26. Essa figura apresenta apenas um intervalo de interesse com o sinal de 4 PMUs, duas da região norte/nordeste (UFPA e UFC) e duas da região sul/sudeste (UFSC e USPSC). Com essa figura, valida-se a informação contida nas formas modais, pois na faixa dos 0,35 Hz a região norte oscila em oposição de fase com a região sul, ou seja, trata-se do modo norte-sul.

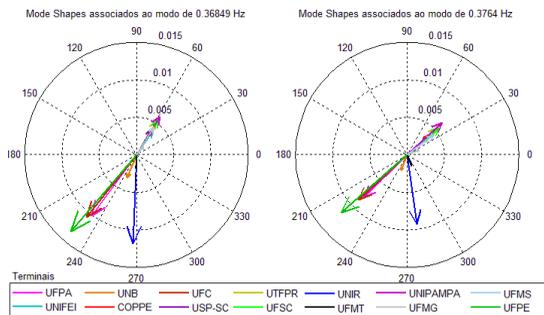


Figura 5.25 – Formas modais: modo norte – sul. Prony(esq.) e HTLS (dir.)

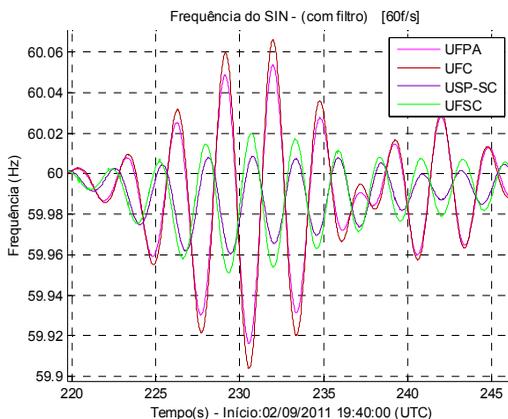


Figura 5.26 – Filtragem passa-faixa (0,3-0,4 Hz).

O modo 2 possui frequência de 0,7 Hz e está na faixa de frequência do modo sul-sudeste. Aplicando-se as formas modais, tem-se a Figura 5.27 que indica que a oscilação corresponde ao modo sul-sudeste, devido à oposição de fase entre os terminais do sudeste/centro-oeste (UFMT, UFMG e UNB) e os terminais do sul (UFSC, UTFPR, UNIPAMPA).

Para validar as formas modais, aplica-se uma filtragem passa-faixa sintonizada em 0,65 e 0,75 Hz, resultando no sinal detalhado na Figura 5.28. Essa figura valida as informações contidas nas formas modais, pois a componente de 0,7 Hz apresenta uma oposição de fase entre as frequências medidas pelas PMUs do sul (UFSC e UNIPAMPA) e aquelas medidas pelas PMUs do sudeste/nordeste (UnB e UFMT).

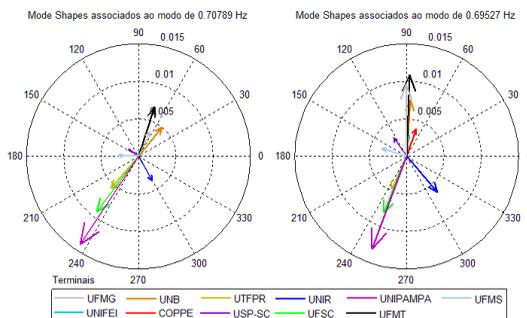


Figura 5.27 – Formas modais: modo sul-sudeste. Prony(esq.) e HTLS (dir.)

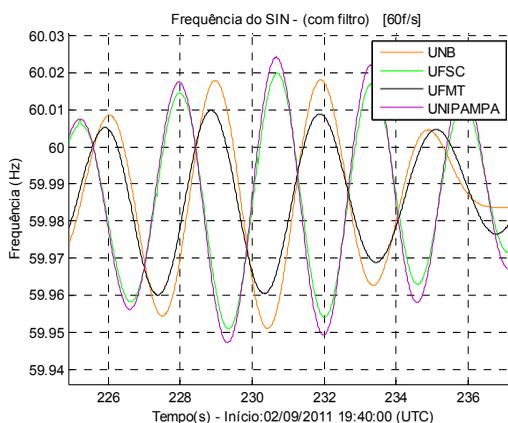


Figura 5.28 – Filtragem passa-faixa (0,65-0,75 Hz)

Na Figura 5.29 estão apresentadas as formas modais para a oscilação próxima a 0,58 Hz. Observa-se que a oposição de fase ocorre entre os terminais do nordeste (UFPE e UFC) e o restante do SIN. Embora esteja na faixa de oscilação do modo norte-nordeste, observa-se pela forma modal medida no terminal da UFPA (Belém – PA) que a amplitude é pequena e a fase não está em oposição ao nordeste, por isso afirma-se que se trata de uma oscilação nordeste – SIN.

Aplicando o filtro passa-faixa sintonizado na frequência de 0,55 a 0,65 Hz, nota-se as frequências monitoradas nas PMUs do nordeste (UFC e UFPE) oscila em oposição de fase com aquelas medidas pelas PMUs do restante do SIN (USP-SC, UNIPAMPA, UFSC). Com isso, confirmam-se os resultados encontrados pelas formas modais.

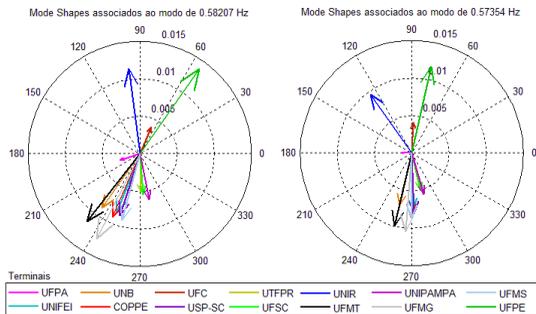


Figura 5.29 – Formas modais: modo 3. Prony(esq.) e HTLS (dir.)

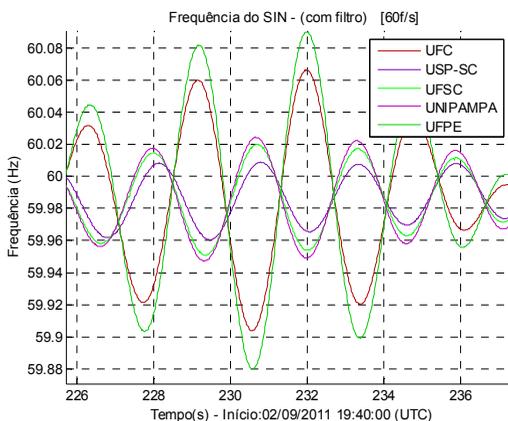


Figura 5.30 – Filtragem passa-faixa (0,55-0,65 Hz).

## 5.2.2 Conclusões para os métodos de identificação de oscilações eletromecânicas a partir de *ringdown*

Com essas análises e também com aquelas realizadas na Seção 4.13 por simulação, conclui-se que os métodos apresentados e os ajustes propostos na Tabela 4.10 são adequados para a realização de estudos de oscilações eletromecânicas a partir de dados de *ringdown* provenientes de um SPMS.

Ao aplicar uma metodologia para identificação de oscilações eletromecânicas é preciso analisar se no instante selecionado o sistema elétrico está em condições de estacionariedade. Em SPMS, o sinal de defasagem angular é bastante sensível a mudanças topológicas. Variações nas tendências ou degraus nessas curvas são indicativos de

que houve mudanças topológicas no sistema elétrico e que este não esta em condições de estacionariedade.

Não se pode afirmar qual a melhor metodologia. Destaca-se que os métodos de Prony e HTLS apresentam resultados equiparáveis, porém o método de Prony exige menor esforço computacional. O método Feixe de Matriz é monossinal, conseqüentemente não permite o cálculo das formas modais, o que torna o método insuficiente.

É importante utilizar mais do que uma metodologia, para que não restem dúvidas com relação aos resultados. Recomenda-se sempre a utilização da DFT para que se conheça de antemão as componentes de frequência presentes no sinal e, posteriormente, a utilização dos métodos de Prony e HTLS. Se não for possível aplicar as duas metodologias, deve-se dar preferência ao método de Prony.

### **5.2.3 Validação das metodologias para processamento de dados ambientes**

Um dos principais desafios que surgem com a medição fasorial sincronizada é o monitoramento em tempo real de modos de oscilações. O uso de metodologias adequadas para o processamento de dados ambientes é um requisito imprescindível para viabilizar essa técnica. As principais dificuldades que surgem nessas metodologias estão relacionadas ao tempo de processamento e aos critérios para a detecção modal automática.

Nessa seção, os métodos RBE, N4SID e Wiener-Hopf são avaliados utilizando os dados do caso 2 descrito na Seção 5.1.2, em que se teve a saída da UHE de Itaipu em decorrência de aberturas de LTs 500 kV e 765 kV.

No Brasil, o modo que mais se evidencia é o modo norte-sul, que oscila com frequência na faixa de 0,2 a 0,4 Hz. Os métodos são aplicados juntamente com o conceito de janelas deslizantes, permitindo assim acompanhar a evolução do modo ao longo do tempo.

Para esse caso, utilizou-se um período de três horas, compreendido das 19 às 22h (UTC) do dia 02/09/2011. Esse período permite observar o comportamento do modo antes do desligamento da UHE de Itaipu, no período em que a UHE de Itaipu permaneceu fora do SIN e após o retorno da usina ao sistema elétrico.

### *Avaliação dos métodos RBE e N4SID*

O ajuste utilizado para os métodos RBE e N4SID está de acordo com o proposto na Tabela 4.10 e foram feitos da seguinte forma:

- Ordem do modelo ( $n$ ) = 15;
- Número de blocos-linha ( $k$ ) = 60;
- Janelas de tempo = 10 minutos;
- Passo da janela deslizante = 10 segundos;
- Taxa de amostragem = 10 fasores/s.

Foram processados simultaneamente os sinais de frequência na UFPA e UNIPAMPA, através do método RBE e N4SID multissinais.

A Figura 5.31 apresenta a defasagem angular entre as tensões de sequência positiva monitoradas pela PMU da UFPA (Belém-PA) e pela PMU da UNB (Brasília – DF). O provável valor de frequência calculado para o modo norte-sul deve estar na faixa de 0,2 – 0,4 Hz. Os valores para o amortecimento deverão seguir a tendência da curva de diferença angular (PRIOSTE, 2011), uma vez que esta é associada ao intercâmbio de potência entre as regiões norte e sul (Seção 3.4).

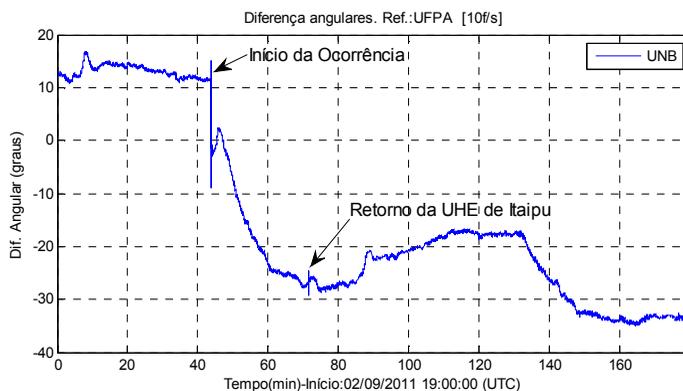


Figura 5.31 – Defasagem angular entre UFPA e UNB.

São destacados nessa figura dois instantes: o de início da ocorrência em que se teve a saída de UHE de Itaipu (43min) e o retorno dessa usina (70min). Nesses instantes têm-se mudanças significativas do sistema, logo o sistema é não estacionário. Como são utilizadas janelas deslizantes de 10 minutos, os períodos do minuto 43 ao 53 e do minuto

70 ao 80, precisam ser desconsiderados. Além desses intervalos, deve-se saber que após o minuto 100 tiveram-se altas taxas de perdas de dados, em decorrência de falha nos canais de comunicação.

### *Avaliação do método RBE*

Fazendo a análise de dados ambientes para avaliar o método RBE, tem-se o resultado da Figura 5.32, que apresenta o comportamento da frequência do modo de oscilação norte-sul e o amortecimento ao longo do tempo.

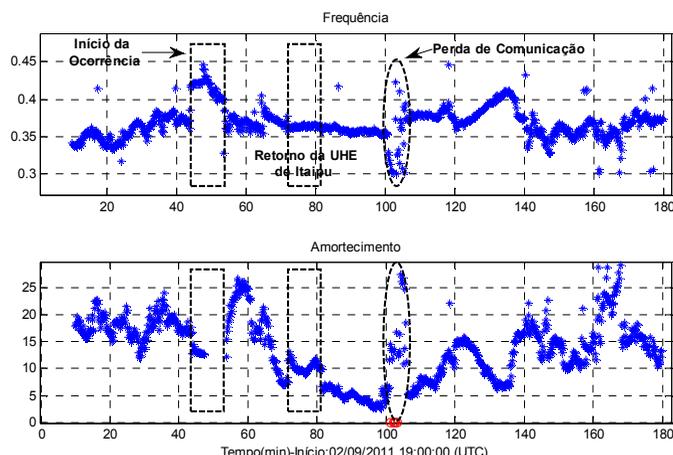


Figura 5.32 – Frequência e amortecimento do modo norte-sul, por RBE.

Nota-se a aderência entre a tendência da curva de defasagem angular entre UFPA e UNB (Figura 5.31) com a tendência da curva de amortecimento, o que indica que a metodologia está bem ajustada. Por exemplo, após a saída da UHE de Itaipu a defasagem angular passa de  $12^\circ$  para valores próximos a  $-25^\circ$ . Na Figura 5.32 percebe-se que nesse período o amortecimento varia de 15% para cerca de 5%. É possível observar também que, após o minuto 130, ocorrem novas variações nos valores da defasagem angular, e a partir de então o amortecimento retorna aos patamares acima de 10%.

No intervalo de 80 a 100min o amortecimento permaneceu mais baixo (5%), e o espalhamento dos resultados praticamente desapareceu.

Conclui-se com isso que em situações mais críticas o método obtém melhores resultados.

Entre os minutos 43 a 53 e 70 a 80, sinalizados na figura pelos retângulos pontilhados, ocorreram falhas nas metodologias em decorrência de mudanças topológicas. Percebe-se nesse intervalo que os valores calculados são descontínuos (degraus na curva). Falhas também ocorrem após o minuto 100 quando se teve índices altos de perdas de dados, sinalizados na figura pela elipse.

### *Avaliação do método N4SID*

O estudo feito com o Método RBE foi repetido com o método N4SID, obtendo como resposta a Figura 5.33.

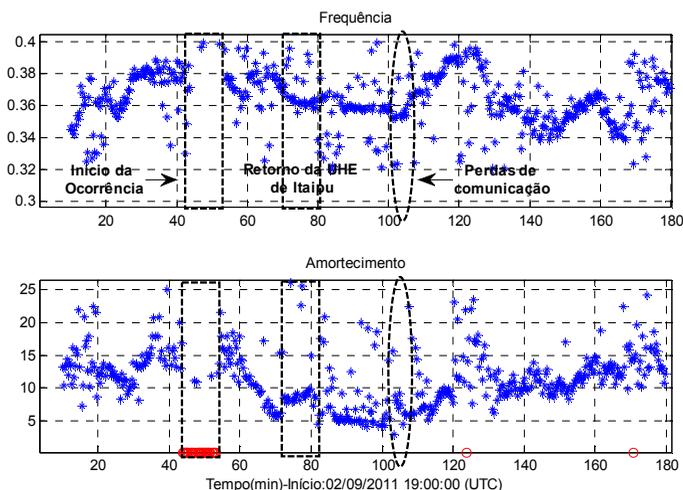


Figura 5.33 – Frequência e amortecimento do modo norte-sul, por N4SID.

Nota-se que o espalhamento dos resultados para o Método N4SID é maior do que para o Método RBE, indicando que o método N4SID possui maior dificuldade em distinguir modos reais de modos espúrios. Deve-se destacar que a detecção modal nesta análise é feita de maneira automática. O método seleciona dentro de uma faixa, neste caso 0,2 a 0,4 Hz, o modo com maior energia. Ocorre que neste método os modos espúrios, que surgem por resíduos matemáticos, acabam possuindo energia superior aos modos reais, causando esse tipo de problema. Porém, pode-se criar uma lógica computacional que analise todos os

valores dentro dessa faixa, descartando os pontos fora de uma curva de tendência global do modo. No entanto, essa solução visa corrigir uma imprecisão na metodologia, não sendo o objetivo dessa avaliação, que por sua vez objetiva analisar o desempenho geral das metodologias.

Apesar disso as tendências gerais são semelhantes, pois o amortecimento sai de pouco mais de 15% antes do evento para valores de até 5%, resultado semelhante ao encontrado pelo método RBE. Nota-se também que nos períodos em que ocorrem as mudanças topológicas o método apresenta falha na detecção.

Contudo, têm-se resultados mais confiáveis através do método RBE. Lembrando que, o método N4SID empregado nesse trabalho necessita da modelagem do sinal de entrada, e essa por sua vez é uma aproximação o que contribui para a imprecisão da metodologia. Já o método RBE faz uma abordagem puramente estocástica em que não é necessário modelar a entrada do sistema. No trabalho de Prioste (2012) o método N4SID foi abordado de maneira estocástica, sem modelagem da entrada, o que fez com que os resultados fossem melhores do que a desta abordagem.

Outro critério avaliado é o tempo de processamento. Utilizando um microcomputador com processador Intel Core i5® 2,4 GHz, e fazendo o processamento de dois sinais simultâneos o método RBE processa 10 minutos de dados amostrados a 10 faixas/s, em um tempo médio de 2,1 segundos, enquanto que o método N4SID para as mesmas condições demanda em média 15,2 segundos. Ou seja, o método RBE é cerca de 7 vezes mais rápido que o método N4SID, sendo o método mais adequado para aplicações futuras de tempo real.

### *Avaliação do método Wiener-Hopf*

O método Wiener-Hopf, conforme apresentado nesse trabalho, não permite o processamento multissinais, o que faz com que a aplicação para identificação de modos de oscilação a partir de dados ambiente fique limitada a um sinal por análise. Por esse motivo, a técnica de processamento por janelas deslizantes não foi implementada para esse método.

Para validar os resultados fornecidos pelo método Wiener-Hopf, são utilizados dados da mesma ocorrência selecionada para os métodos RBE e N4SID.

A Tabela 5.13 apresenta os resultados encontrados para os quatro intervalos de tempo destacadas na Figura 5.34. O primeiro intervalo compreende do minuto 25 ao 35 (antes da ocorrência). O segundo

compreende do minuto 60 ao 70 (após a ocorrência), neste instante o sistema não contava com a UHE de Itaipu. O terceiro intervalo compreende do minuto 105 ao 115 (alguns minutos após o retorno da UHE de Itaipu) e, por fim, o quarto intervalo de tempo que compreende do minuto 170 a 180, em que se considera que o sistema elétrico estava estabilizado em um outro ponto de operação.

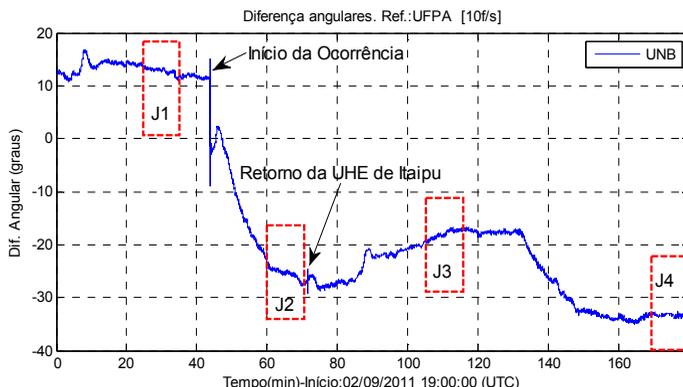


Figura 5.34 – Frequência no SIN.

Percebe-se pela Tabela 5.13 que os métodos N4SID e RBE encontram resultados semelhantes. Nota-se resultados ainda melhores para os casos em que o amortecimento é menor, o que é um indicativo positivo, pois em situações críticas os métodos tendem a fornecer melhores resultados.

Tabela 5.13 – Comparação entre RBE, N4SID e Wiener-Hopf.

Métodos	25-35min		60-70min		105-115min		170-180min	
	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
RBE	0,38	20,5	0,37	7,6	0,38	7,7	0,36	14,1
N4SID	0,38	17,0	0,37	7,0	0,38	7,9	0,37	23,0
W-H	0,37	26,7	0,37	11,9	0,37	<b>18,8</b>	0,37	14,00

Através dessa tabela, percebe-se uma tendência do método Wiener-Hopf em encontrar amortecimentos maiores do que os outros, principalmente na terceira janela. Como os métodos RBE e N4SID apresentaram coerência entre os valores de amortecimento e a tendência da curva de diferença angular, sugere-se que o método Wiener-Hopf não seja utilizado como metodologia principal.

#### **5.2.4 Conclusões para os métodos de identificação de oscilações eletromecânicas a partir de dados ambiente**

Percebeu-se por esta análise a robustez do método RBE, nesse estudo de validação. Os resultados encontrados por esse método apresentaram menor espalhamento e menor tempo de processamento, quando comparados ao método N4SID.

O método N4SID apresentou grande sensibilidade a modos espúrios, fazendo com que esses sejam identificados com grande energia, dificultando a prática de identificação modal automática. Porém, quando utilizada a detecção manual, o método apresenta resultados compatíveis com o método RBE, pois os modos espúrios acabam sendo perceptíveis quando analisados manualmente.

O método Wiener-Hopf possui a desvantagem de processar apenas sinais individuais, o que acaba dificultando o processo de identificação de oscilações interáreas, uma vez que só se pode processar o sinal de apenas uma área. Além disso, os resultados encontrados por este método divergiram daqueles encontrados pelo N4SID e RBE.

#### **5.2.5 Aplicação da DFT em dados ambientes**

Para validar a metodologia da DFT em dados ambientes, foi selecionado um terceiro caso. Embora não descrito no IPDO, constatou-se nos dias 5 a 9 de maio de 2012 uma oscilação sustentada na região de Mato Grosso do Sul. Essa oscilação foi identificada através do programa MDF, de processamento em tempo real (DECKER *et al.*, 2011), e monitorada com maior intensidade no terminal da UFMS (Campo Grande – MS). A frequência dessa oscilação estava próxima a 0,6 Hz, como apresentado no espectro de frequências da Figura 5.35, calculado pela DFT do sinal de diferença angular entre UFMS (Campo Grande – MS) e UFSC (Florianópolis). Segundo informações não oficiais, essa oscilação surgiu em decorrência do despacho de usinas de biomassa na região do Mato Grosso do Sul próximas a Campo Grande.

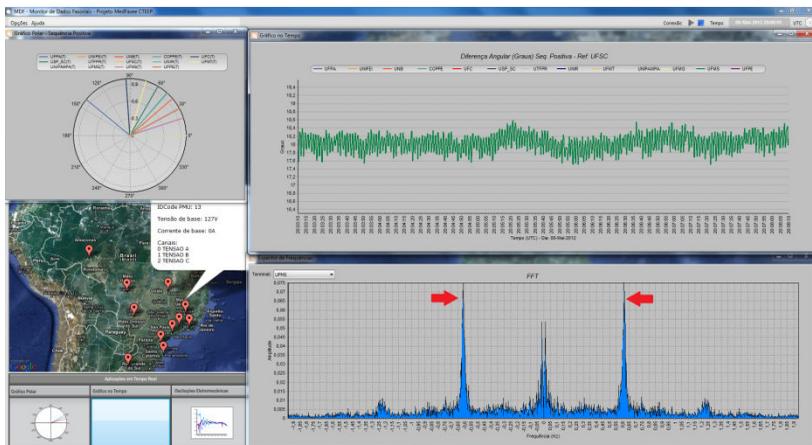


Figura 5.35 – Programa MDF – sinalização de oscilação próximo 0,6 Hz.

Analisando o espectro de frequências da Figura 5.36 para todos os sinais monitorados no SPMS MedFasee BT, percebe-se que essa oscilação é evidenciada somente pela PMU de Campo Grande – MS (UFMS).

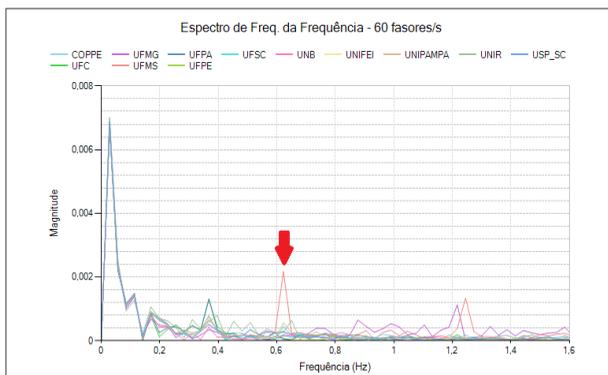


Figura 5.36 – Programa MDF – Espectro de Frequências (DFT).

Assim, serão utilizados esses registros para validar os resultados encontrados pela DFT utilizando o processamento por janelas deslizantes. Para esse caso, foi ajustada uma janela de tempo de 30 segundos com passo de 3 segundos. Como essa oscilação esteve presente no SIN por cerca de 5 dias, as avaliações serão feitas utilizando dados das 24h desses dias.

### 05/05/2012 – Início das oscilações

Para fazer uma análise completa das informações registradas, foram carregados no DFAM os dados das 24 horas do dia 05/05/2012 a uma taxa de amostragem de 10 fasores/s.

Assim, foi identificado que a oscilação surgiu em um primeiro momento à 1h27min (UTC), o que equivale às 22h27min do dia 04/05/2012 horário de Brasília (GMT – 3). Essa oscilação se manteve por volta de 30 minutos, como pode ser observado através da diferença angular entre a UFMS (Campo Grande – MS) e UFSC (Florianópolis – SC), esboçada na Figura 5.37.

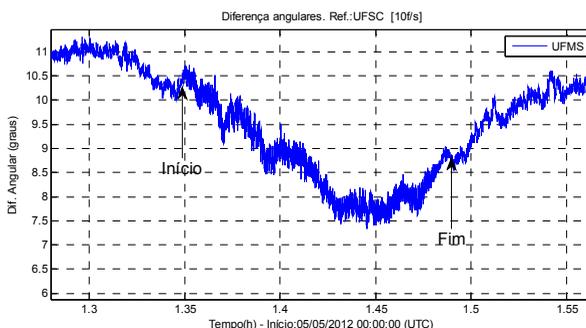


Figura 5.37 – Início da oscilação.

Às 2h23min (UTC) a oscilação recomeça (Figura 5.38) e permanece evidente até o dia 09/05/2012 às 13h58min (UTC) (10h58min local). O recomeço da oscilação é apresentado na Figura 5.38.

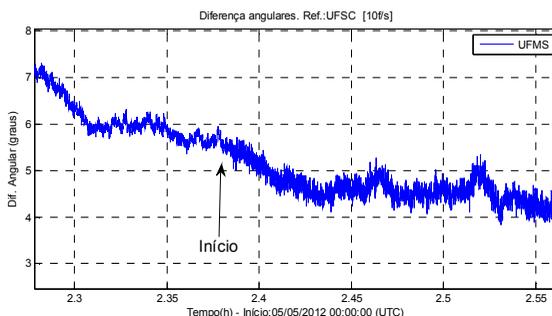


Figura 5.38 – Início da oscilação sustentada.

A Figura 5.39 detalha um intervalo de tempo em que se percebe a existência da oscilação.

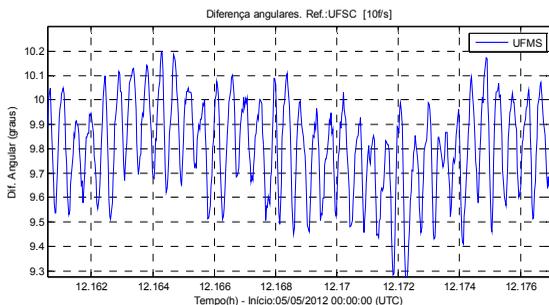


Figura 5.39 – Detalhe da oscilação.

Esse modo de oscilação pode ser monitorado através da DFT tridimensional, por meio de janelas deslizantes. Aplicando esse método ao sinal de diferença angular (UFMS – UFSC), tem-se o espectro de frequências tridimensional da Figura 5.40. Com essa figura, é possível observar o primeiro instante, em que a oscilação surge momentaneamente, e o recomeço da oscilação sustentada. Nota-se também que próximo às 12h o valor da frequência de oscilação que estava próximo a 0,63 Hz decai para valores em torno de 0,6 Hz. Após as 14h ocorrem problemas de comunicação entre a PMU da UFMS e o PDC, resultando altos índices de perda de dados.

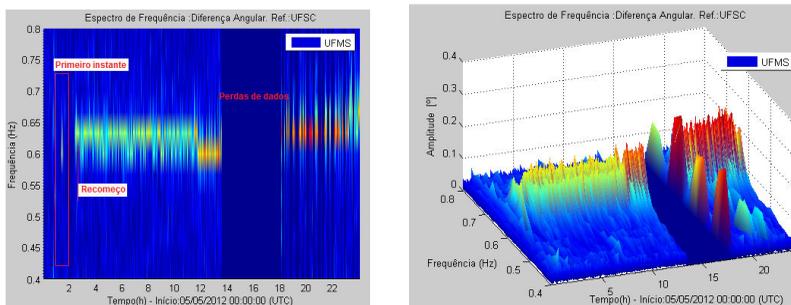


Figura 5.40 – DFT: dia 05/05/2012.

Para confirmar esses resultados, repetiu-se a análise utilizando o Método RBE com janelas deslizantes, de forma a verificar a frequência e amortecimento desse modo ao longo do tempo. Próximo às 14h

ocorrem perdas de comunicação com o terminal da UFMS. Portanto, a análise pelo método RBE é feita somente até às 14h desse dia.

A Figura 5.41 apresenta o resultado encontrado pelo método RBE. Foi ajustada uma ordem de  $n = 15$ , número de blocos linha igual a 60, janela de 10 minutos e passo de 20 s, para o sinal de diferença angular entre UFMS e UFSC. Por esse método percebe-se que antes do início da ocorrência o método detecta apenas modos espúrios, sem interpretação física, destacado no primeiro retângulo. Após o início, às 2h23min (~2,3no gráfico), o método passa a identificar valores em torno de 0,63 Hz com amortecimento menor do que 1%.

Outro aspecto importante e que valida a metodologia da DFT e reforça a confiança no método RBE, é notado por volta das 12h em que se observa uma mudança evidente no patamar de frequência do modo, destacado no segundo retângulo. Essa mudança ocorre no mesmo instante no gráfico da DFT da Figura 5.40 indicando que os resultados encontrados pelo método RBE e DFT estão coerentes.

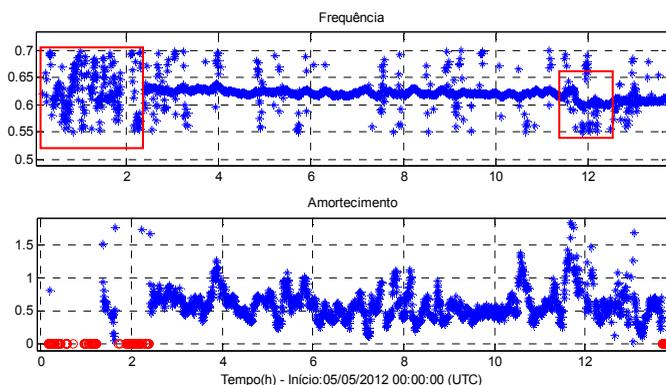


Figura 5.41 – Frequência e amortecimento da oscilação.

### *06/05/2012- 2ª dia das oscilações*

A oscilação continuou por todo o dia 06, como pode ser visto pelo espectro de frequências da Figura 5.42. Percebe-se que entre 1h30min e 2h (UTC) a oscilação fica menos intensa. Nota-se ainda uma componente de frequência próximas a 1,3 Hz.

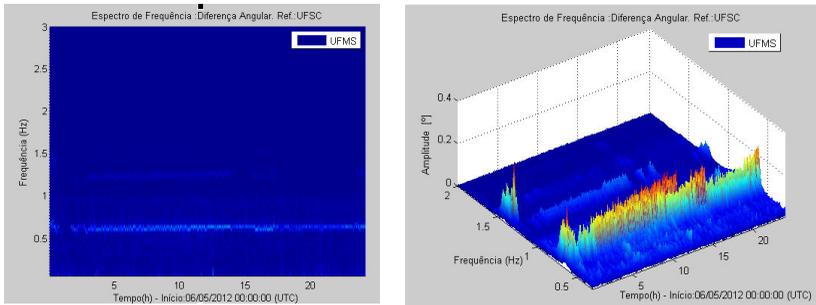


Figura 5.42 – DFT: 06/05/2012

### *07/05/2012- 3º dia das oscilações*

No dia 07/05/2012 a oscilação se manteve presente durante todo o período, como pode ser visto no espectro de frequências da Figura 5.43. Nota-se também uma componente próxima a 1,3 Hz.

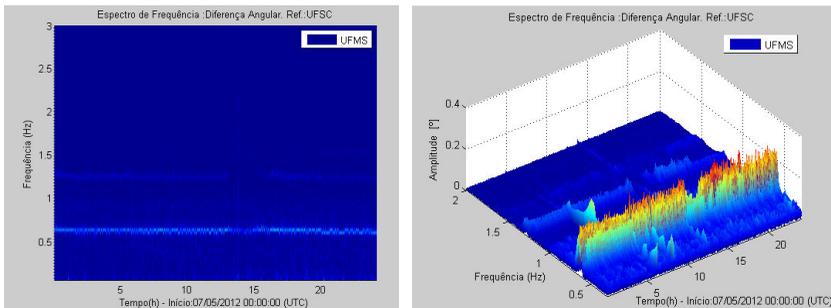


Figura 5.43 – DFT: 07/05/2012

Para comparar os resultados fornecidos pelos métodos RBE, N4SID e Wiener-Hopf foram selecionados quatro intervalos de 10 minutos distribuídos ao longo do dia 07, no qual os resultados estão apresentados na Tabela 5.14. Observa-se por esta tabela que ambos os métodos indicam uma oscilação próxima a 0,62 Hz com amortecimento inferior a 1%, reforçando a conclusão de que as metodologias tendem a fornecer melhores resultados para as situações mais críticas, que são aquelas com menor amortecimento.

Tabela 5.14 – Comparação entre RBE, N4SID e Wiener-Hopf.

	0 - 0h10		12 - 12h10		18 - 18h10		23h50 - 24h	
Métodos	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
RBE	0,64	0,38	0,62	0,43	0,63	0,76	0,61	0,70
N4SID	0,64	0,35	0,62	0,36	0,63	0,64	0,62	0,47
W.H.	0,63	0,84	0,62	0,64	0,62	0,75	0,61	0,93

### 08/05/2012- 4<sup>o</sup> dia das oscilações

Neste dia a oscilação continuava evidenciada, com características semelhantes aos dias anteriores.

### 09/05/2012 – Final das oscilações

O modo desapareceu por volta das 13h58min (10h58min local), como mostrado na Figura 5.44 e Figura 5.45. É possível notar que a componente próxima a 1,2 Hz também é atenuada.

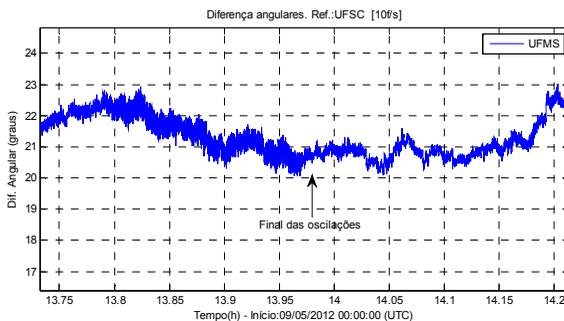


Figura 5.44 – Término das oscilações pouco amortecidas.

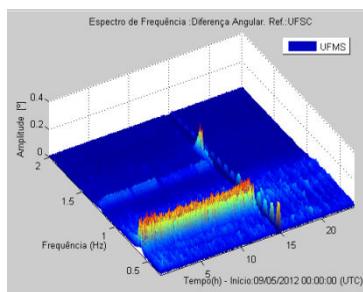
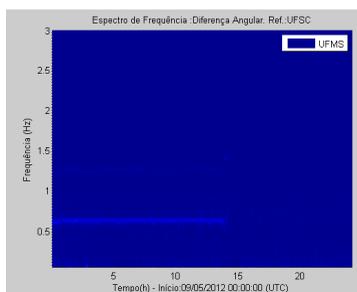


Figura 5.45 – Espectro de frequências.

Para acompanhar a evolução da frequência e do amortecimento desse modo, utilizou-se o método RBE em uma janela de tempo de uma hora, sendo 30 minutos precedentes ao final da oscilação mal amortecida e 30 minutos após. Dessa forma, tem-se o resultado na Figura 5.46

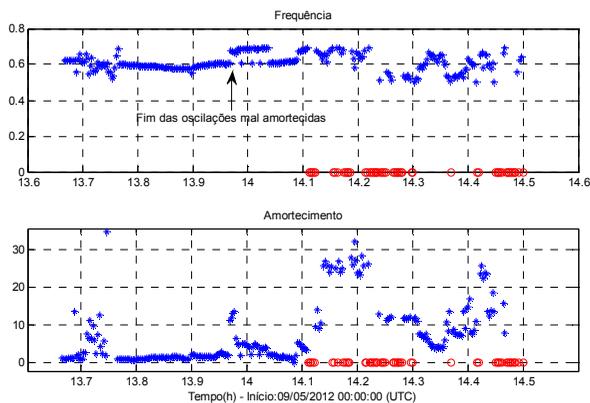


Figura 5.46 – Frequência e amortecimento da oscilação (período final).

Nessa análise, percebe-se que a partir das 13h58min (13,95h no gráfico) o método RBE passa a identificar esta componente com maior amortecimento. A partir de então, a componente começa a ficar pouco evidente, como pode ser visto pela DFT e pelo método RBE, que começou a ter maior dificuldade de identificar o modo, devido à baixa amplitude e ao amortecimento superior a 10%, reforçando assim a confiança nos métodos aqui apresentados.

### 5.3 COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Nesse capítulo, os métodos apresentados no Capítulo 3 e as recomendações de ajustes do Capítulo 4 são aplicadas em dados reais do sistema elétrico brasileiro, medidos através do SPMS MedFasee BT. Com essa análise, foi possível avaliar o desempenho dos métodos e constatar que, de maneira geral, o conjunto de métodos disponibilizados atendem ao objetivo, que é de fazer a identificação de oscilações eletromecânicas a partir de dados fasoriais sincronizados.

Nesse capítulo demonstrou-se também a importância do ambiente DFAM na realização de estudos de ocorrência, bem como a clareza de informações que podem ser obtidas a partir de dados fásoriais sincronizados durante a análise de uma ocorrência no SIN.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos desenvolvimentos descritos no presente trabalho, afirma-se que os objetivos propostos foram alcançados. Foi disponibilizado um ambiente computacional (DFAM) com grande aplicabilidade e com a possibilidade de adicionar novas funcionalidades. Como contribuição principal desse trabalho, destaca-se o estudo das metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas, em que foram considerados aspectos práticos para a aplicação das metodologias em dados reais provenientes de SPMS.

### 6.1 AMBIENTE DFAM

O DFAM está sendo amplamente utilizado nos desenvolvimentos realizados no âmbito do projeto MedFasee, servindo de base para novos trabalhos como Zimmer (2012), Brustolin (2012) e Benneti (2012).

Além de facilitar a implementação de novas funcionalidades, o DFAM tem auxiliado na elaboração de artigos científicos nacionais e internacionais, em *workshops* e cursos de capacitação de profissionais na área de medição fasorial sincronizada e em palestras de divulgação do projeto MedFasee. Concomitantemente, o DFAM tem auxiliado na elaboração de relatórios de ocorrência fornecidos ao Operador Nacional do Sistema (ONS), colaborando com a identificação das causas e com o planejamento da operação do SIN. Entre os estudos de perturbações realizados podem-se listar os seguintes eventos:

- 04/02/2011 – Blecaute na região nordeste.
- 02/09/2011 – Perda de 5.100MW da UHE Itaipu.
- Desligamentos na interligação AC/RO – SIN. Destaque para 27/05/2011 e 24/11/2011 com oscilações mal amortecidas.
- 06/03/2012 – Oscilações sustentadas em Cachoeira Dourada.
- 26/10/2012 – Blecaute na região nordeste.

Entre as principais dificuldades encontradas no desenvolvimento do DFAM menciona-se a definição do padrão adotado de forma a facilitar a integração de diversos desenvolvimentos. Este planejamento objetivou evitar problemas futuros de falta de compatibilidade e, conseqüentemente, desperdiçar parte dos desenvolvimentos anteriores.

Conclui-se que o padrão definido tem atendido sem restrições todas as demandas até então solicitadas.

## 6.2 METODOLOGIAS DE IDENTIFICAÇÃO DE OSCILAÇÕES ELETROME CÂNICAS

Nesse trabalho foram avaliadas metodologias para a identificação de oscilações eletromecânicas utilizando dados reais de medição fasorial sincronizada. Foram selecionados os Métodos de Prony, HTLS, Feixe de Matrizes, N4SID, Realização Balanceada Estocástica (RBE), Wiener-Hopf e a DFT.

As oscilações eletromecânicas podem ser monitoradas nos sistemas elétricos, tanto nas situações de *ringdown* (transitório) quanto em dados ambiente (regime permanente). Para a correta obtenção dos resultados, as metodologias devem ser adequadamente empregadas em cada uma dessas situações. Para situações de *ringdown*, devem ser utilizados métodos de reconstrução de sinal, nesse caso, os métodos de Prony, HTLS e Feixe de Matrizes. Para dados ambiente devem ser utilizados os métodos de estimação do modelo linear, como N4SID e RBE. A DFT possui a vantagem de ser empregada tanto em *ringdown* quanto em dados ambientes, mas com a desvantagem de não fornecer o valor do amortecimento do modo de oscilação.

Como principal contribuição desse trabalho tem-se o conjunto de recomendações apresentadas no Capítulo 4. Essas regras proporcionam a adequada aplicação dos métodos, com destaque para os ajustes dos parâmetros das metodologias (ordem do modelo, tamanho da janela, taxa de amostragem, entre outras). As regras apresentadas nesse capítulo foram obtidas principalmente através da experiência adquirida com a utilização dessas metodologias e podem ser utilizadas como uma estimativa inicial para os estudos. Os resultados obtidos no Capítulo 4 foram sintetizados na Tabela 4.10 e são válidos para aplicações em dados de medição fasorial sincronizada.

Com relação ao desempenho das metodologias, conclui-se que para *ringdown* as metodologias disponíveis atendem as necessidades. O potencial do método de Prony já era conhecido e esse muito utilizado no Projeto MedFasee desde o trabalho de Santos (2008). Porém, constatou-se que o método HTLS possui desempenho muito semelhante, inclusive com a possibilidade de esboçar as formas modais. Recomenda-se sempre que possível utilizar esse método para a comparação de

resultados. Na impossibilidade de aplicar os dois métodos, o método de Prony torna-se o método mais indicado para situações de *ringdown*.

Outra conclusão desse trabalho está na importância da DFT em estudos de oscilações eletromecânicas. Os resultados fornecidos pela DFT são bastante confiáveis, tornando-a um método imprescindível em estudos nessa área. Por isso, não se recomenda a aceitação de nenhum resultado encontrado por métodos como o de Prony e HTLS sem uma avaliação prévia utilizando DFT.

Com relação ao método Feixe de Matrizes, constatou-se que apesar de fornecer bons resultados, não trouxe vantagens aos estudos realizados. O principal motivo está em não permitir o esboço das formas modais.

Com relação às metodologias para identificação de oscilações eletromecânicas, a partir de dados ambiente, foram descritos os Métodos N4SID, Realização Balanceada Estocástica (RBE) e Wiener-Hopf.

Os métodos N4SID e RBE apresentaram tendências semelhantes, apesar de o método N4SID ter mais dificuldades em separar modos reais de modos espúrios. O índice de detecção modal utilizado neste trabalho é a energia e amplitude do modo. O Método N4SID encontra corretamente os valores reais, porém em muitos casos a energia ou amplitude dos modos espúrios são maiores do que a do modo real. Isso faz com que as técnicas de detecção automáticas falhem, fornecendo valores incoerentes. Reitera-se que o método N4SID, da forma como foi abordado nesse trabalho, necessita da modelagem do sinal de entrada. No trabalho de Prioste (2011), o método N4SID é abordado de maneira puramente estocástica e os resultados foram notadamente melhores.

Constatou-se que o método RBE apresentou comportamentos bastante satisfatórios, sendo indicado para análise de dados ambientes. Além da qualidade dos resultados encontrados pelo método RBE, destaca-se o tempo de processamento, cerca de 7x menor que aquele do método N4SID, permitindo ser empregado em metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas em tempo real.

Constatou-se que o método Wiener-Hopf não adicionou vantagens na identificação de oscilações eletromecânicas em dados ambiente, sendo o método N4SID e RBE os mais indicados para esse tipo de estudo.

Apesar dos resultados apresentados nesse trabalho, o monitoramento de um modo de oscilação a partir de dados ambientes continua sendo um desafio. Um exemplo disso, é o estudo publicado no trabalho de Rauhala *et al.* (2011) que descrevem um SPMS construído na Finlândia com o objetivo de monitorar uma oscilação eletromecânica

de aproximadamente 0,3 Hz entre o sudeste da Finlândia e o sul da Escandinávia (Noruega, Suécia e Dinamarca). Ao fim do projeto, concluíram que o objetivo não foi alcançado, sendo necessários avanços metodológicos significativos. Porém, nesse mesmo trabalho concluiu-se que o SPMS trouxeram ao sistema elétrico daquela região outras contribuições significativas, de forma a justificar novos investimentos naquele SPMS.

De maneira geral, as metodologias para identificação de oscilações eletromecânicas utilizando dados ambiente precisam ser mais exploradas. Os resultados, embora com características satisfatórias, atendem com restrições as necessidades deste tipo de análise.

Os estudos de oscilações eletromecânicas em tempo real necessitam de pesquisas adicionais, sendo a DFT ainda a melhor opção. No âmbito do projeto MedFasee, alguns aplicativos fazem a estimativa do valor da frequência do modo de oscilação em tempo real utilizando a DFT. A vantagem é a confiabilidade dos resultados e o tempo de processamento e a desvantagem é não fornecer o valor do amortecimento. Contudo, pela análise da Seção 5.2.5, em que foram monitoradas oscilações sustentadas no Mato Grosso do Sul, a DFT foi fundamental na identificação daquele problema.

Com isso, avalia-se que os objetivos propostos com a elaboração desse trabalho foram alcançados. Esses desenvolvimentos serão de grande utilidade na elaboração de novos trabalhos acadêmicos, auxiliando na formação de profissionais especialistas e no desenvolvimento da tecnologia de medição fasorial sincronizada no Brasil.

### 6.3 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS

Parte dos desenvolvimentos e resultados desse trabalho foram apresentados em congressos nacionais listados na sequência.

#### **Artigos técnicos como autor principal:**

1 – JEREMIAS, Thiago; ZIMMER, Valmor; DECKER, Ildemar C.; SILVA, Aguinaldo S. e AGOSTINI, Marcelo N. Ambiente de Desenvolvimento de Aplicativos para o Processamento de Dados Fasoriais Sincronizados do Sistema Elétrico Brasileiro. In: XII SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica. Rio de Janeiro, RJ, Mai.2012.

2 – JEREMIAS, Thiago; ZIMMER, Valmor; DECKER, Ildemar C.; SILVA, Aguinaldo S. e AGOSTINI, Marcelo N. Estudo de Oscilações Eletromecânicas no Sistema Elétrico Brasileiro Utilizando Medidas Fasoriais Sincronizadas. *In: XIX CBA – Congresso Brasileiro de Automática*. Campina Grande, PB, Set.2012.

3 – JEREMIAS, Thiago; ZIMMER, Valmor; DECKER, Ildemar C.; SILVA, Aguinaldo S. e AGOSTINI, Marcelo N. Estudo do Desempenho de Metodologias para o Monitoramento em Tempo Real dos Modos de Oscilação Eletromecânicas do SIN utilizando Medição Fasorial Sincronizada. *In: XI STPC – Seminário Técnico de Proteção e Controle*. Florianópolis, SC, Nov. 2012.

#### **Artigos técnicos como coautor:**

4 – ZIMMER, Valmor; JEREMIAS, Thiago; DECKER, Ildemar C. e AGOSTINI, Marcelo N. Aplicação de Dados de Medição Fasorial Sincronizada na Análise do Desempenho da Interligação AC-RO/SIN. *In: IV SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. Goiânia, GO, Mai. 2012.

5 – ZIMMER, Valmor; JEREMIAS, Thiago; DECKER, Ildemar C. e AGOSTINI, Marcelo N. Detecção de Perturbações Sistêmicas usando Dados de Medição Fasorial Sincronizada. *In: XIX CBA – Congresso Brasileiro de Automática*. Campina Grande, PB, Set.2012.

## 6.4 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com relação aos métodos de identificação de oscilações eletromecânicas, sugere-se avaliar outros métodos propostos na literatura, principalmente para dados ambiente, e aperfeiçoar as técnicas de detecção automática dos modos.

Com o ambiente DFAM foram disponibilizados 5 módulos de análise. Nesse trabalho foi aprofundado apenas o módulo de análise de oscilações eletromecânicas e algumas funcionalidades básicas para os demais. É possível ainda incluir muitas funcionalidades ao demais

módulos. Algumas sugestões de trabalhos que podem ser incluídas dentro destes módulos são listadas a seguir.

**a) Análise de regime permanente.**

- Estudos de predição e alarme de estabilidade de tensão;
- Estudos de predição e alarme de estabilidade angular;

**b) Análise de ocorrência.**

- Estrutura de predição para esquemas de controle de emergência;

**c) Detecção e identificação de eventos.**

- Criação de sistemas especialistas para auxílio na identificação de eventos no sistema elétrico.

**d) Qualidade de energia elétrica.**

- Implementação dos índices de Qualidade de Energia Elétrica propostos pelo Prodist.

**e) Análise de oscilações eletromecânicas.**

- Avaliação de outros métodos para dados ambiente.

Identificou-se ainda que é possível incluir nesse ambiente dois novos módulos, sendo eles:

**f) Tempo real.**

**g) Estimacão híbrida de estados.**

Além da inclusão dessas novas metodologias, sugere-se que o as funcionalidades do DFAM sejam transcritas para outros compiladores, que utilizam linguagens como C/C++ e C#, tornado válido a característica do DFAM de elaborar protótipos de programas e metodologias.

## REFERÊNCIAS

- ABB. **PSGuard wide area monitoring system**. Disponível em: [www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/2ea7f47488be37c0c125784f002b8260/\\$file/1khl501068%20%20psguard%20brochure\\_v.1.0.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/2ea7f47488be37c0c125784f002b8260/$file/1khl501068%20%20psguard%20brochure_v.1.0.pdf). Acesso: Nov.2011.
- ANDERSSON, G *et al.* Causes of the 2003 Major Grid Blackouts in North America and Europe, and Recommended Means to Improve System Dynamic Performance. **In: IEEE Transactions on Power System**. v. 20, n. 4. Nov. 2005.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82&idPerfil=2>. Acesso: 24 abr. 2012.
- BENETTI, Marcelo A. **Utilização de Medição Fasorial Sincronizada em Metodologias de Localização de Falhas em Linhas de Transmissão**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, SC. Out.2009.
- BENETTI, Marcelo A.; DECKER, Ildemar C.; AGOSTINI, Marcelo N. e BASTOS, Mario R. Estudo da Influência dos Canais de Instrumentação na Exatidão de Medidas Fasoriais Sincronizadas e seus Efeitos em Aplicações. **In: XII SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica**. Rio de Janeiro, RJ, Mai.2012.
- BERTSCH, J.; CARNAL, C.; KORBA, M. P.; INGRAM; BROSKI, L.; SA TTINGER, W. Experiences and benefits of systems for wide area monitoring. **In: WPDA – Western Power Delivery Automation Conference**, Apr. 2004.
- BRAHMA, S. M.; GIRGIS, A. A. Fault Location on a Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements. **In: IEEE Transactions on Power Delivery**, p. 1619-1622, Oct. 2004.

BRASIL. Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. **Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]**, Brasília, DF, n. 32, 14 fev. 1995. Seção 1, p. 1917-1923.

BRUSTOLIN, Geyson *et al.* Aplicação da Transformada Wavelet para Detecção de Eventos no SIN Utilizando Dados Fasoriais Sincronizados. In: **XII SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica**. Rio de Janeiro, RJ, Mai.2012.

BRUSTOLIN, Geyson. Aplicação da Transformada Wavelet para Detecção de Eventos no SIN Utilizando Dados Fasoriais Sincronizados. Dissertação de Mestrado (em andamento). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2012.

BORGUETTI, A. et al. Synchronized phasors monitoring during the islanding maneuver of an active distribution network. In: **Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2010**. p. 1-8. Jan. 2010.

CAI, Jim Y.; HUANG, Zhenyu; HAUER, John and MARTIN, Ken. Current Status and Experience of WAMS Implementation in North America. In : **Transmission and Distribution Conference and Exhibition : Asia and Pacific**. IEEE/PES 2005.

CANNON, R. C. **Dynamics of Physical Systems**. International Student Edition. New York, USA: McGraw-Hill, p.248-255, 1967.

CHEN, Jingdong; BENESTY, Jacob; HUANG, Yiteng and Doelo, Simon. New Insights into the Noise Reduction Wiener Filter. In: **IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing**. v.14, n.4, p.1218-1234. Jul, 2006.

CHEN, Chi-Tsong. **Linear System Theory and Design**. 3.ed. New York, Oxford University Press, 1999.

DECKER, I. C.; DOTTA, D.; AGOSTINI, M. N. et al.; 2006. Performance of a Synchronized Phasor Measurements System in the Brazil Power System. In: **IEEE PES General Meeting**. Montreal, Canadá, Junho de 2006.

DECKER, Ildemar C. *et al.* Applications of a Synchronized Phasor Measurement System in Southern Brazil. In: **X Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning – SEPOPE**, 2006.

DECKER, Ildemar C. *et al.* Estudo e avaliação de um protótipo de um sistema de medição fasorial sincronizada instalado no sistema de transmissão da Eletrosul. Em: **XX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. 22-25/11, Recife, PE, 2009.

DECKER, Ildemar C.; SILVA, Aguinaldo Silveira e; SILVA, Rui J. G. ; AGOSTINI, Marcelo N. ; MARTINS, Nelson ; PRIOSTE, Fernando B. System Wide Model Validation of the Brazilian Interconnected Power System. In: **IEEE PES General Meeting**, Minneapolis, Minnesota.USA, 2010.

DECKER, Ildemar C. ; SILVA, A. Silveira ; PRIOSTE, F. B. ; AGOSTINI, M. N. ; DOTTA, D . Experience of WAMS development and applications in Brazil. In: **17th Power Systems Computation Conference, 2011**, Estocolmo. PSCC 2011, 2011

DECKER, Ildemar C. *et al.* 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. Out. 2011.

DOTTA, Daniel. **Controle Hierárquico usando Sinais de Medição Fasorial Sincronizada**. Tese de Doutorado. Programa de pós graduação em Engenharia Elétrica Universidade Federal de Santa Catarina. 2009

DONNELLY, M.; INGRAM, M. and CARROLL, J.R. Eastern Interconnection Phasor Project. In: **System Sciences, 2006. HICSS '06. Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference**. V. 10, 04-07 Jan. 2006.

EHRENSPERGER, J. G.; DECKER, I. C. ; AGOSTINI, M. N. ; e SILVA, A. S. ; BETTIOL, A. L. ; UTURBEY, W. . Desenvolvimento de um Simulador de Sistemas de Medição Fasorial. In: **Congresso Brasileiro de Automática – CBA**. Gramado, RS. 2004.

ELPROS. **WAProtector**. Disponível em: <http://www.elpros.si>. Acesso: 29 nov.2011.

EPG. **Electric Power Group**. [www.electricpowergroup.com](http://www.electricpowergroup.com). Acesso: Set. 2012

FAUCON, O.; DOUSSET, L. Coordinate defense plan protects against transient ins-tabilities. In: **IEEE - Computer Applications in Power**, v. 10, n. 3, p. 22–26, 1997.

FILHO, Anésio de Leles Ferreira, OLIVEIRA, Marco A., PINTO, Marcos G. da S. Ferramenta Computacional para Quantificação e Qualificação do Desequilíbrio de Tensão. In: **VI SBQEE - VI SBQEE –Sociedade Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica**. Belém, PA. Ago.2005.

FOUAD, A.A. and ANDERSON, P.M. **Power System Control and Stability**. The Iowa State University Press, 1997.

FÜRSTENBERGER, Alexandre. **Desenvolvimento de um Sistema de Concentração de Dados de Medição Fasorial Sincronizada**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, SC. 2010.

GAVIOLI, George A. *et al.* Utilização de Medição Fasorial Sincronizada na Validação de Modelos em Sistemas de Energia Elétrica: Princípios, Práticas Atuais e Desafios para sua Incorporação às práticas de Análise do Sistema Interligado Nacional. In: **XXI SNTPEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. GAT 11. Out, 2011.

GOMEZ, Jorge E. *et al.* Validação de Modelos de Unidades Geradores do Sistema Interligado Colombiano usando Dados de Medição Fasorial Sincronizada. In: **XII SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica**. Rio de Janeiro, RJ, Mai.2012.

GONG, Yanfeng *et al.* Synchrophasor-Based Real-Time Voltage Stability Index. In: **Power Systems Conference and Exposition.**, 2006. PES'06 IEEE PES, p.1029-1036. Oct, 2006.

GPS. **Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics.** Disponível em: [www.gps.gov/policy](http://www.gps.gov/policy). Acesso em: Jul. 2012.

GPA – Grid Protection Alliance. **OpenPDC.** Disponível em: <http://openpdc.codeplex.com>. Acesso em: set. 2012.

HALLIDAY, David; RESNICK, Roberto e WALKER, Jearl. Fundamentos de Física – Mecânica – vol. 1, 4 ed. LTC, 1996.

HAUER, John F. and CRESAP, R. L. Measurement and Modeling of Pacific AC Intertie Response to Random Load Switching. In: **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, vol. PAS-100, n. 1, pp. 353-359, jan. 1991.

HAUER, John F.; DEMEURE, Cedric J.; and SCHARF, Louis L. Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals. In: **IEEE Transactions on Power Systems**, v.5 n.1 p.80-89. Feb.1990.

HOROWITZ, S. H., PHADKE, A. G., RENZ, B. A. The Future of Power Transmission. In: **IEEE Power & Energy Magazine**, v.8, n.2, p. 34-40, Mar.-Apr., 2010.

IEEE Power Engineering Society. **C37.111 – IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems.** 1991.

IEEE Power Engineering Society. **1344 – IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.** 1995.

IEEE Power Engineering Society. **C37.118-2005 – IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.** 2005

IEEE Power Engineering Society. **C37.118.1. – IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.** 2011.

IEEE Power Engineering Society. **C37.118.2 – IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems**. 2011.

IKRAMOV, Kh. D. Matrix pencils: Theory, applications, and numerical methods. In: **Journal of Mathematical Sciences**, v.64, n.2, 783-853. Feb. 2005.

Instituto EDP. **História da Energia Elétrica no Brasil**. Disponível em: [http://www.institutoedp.com.br/institutoedp/pesquisadores\\_estudantes/energia\\_eletrica/historia\\_energia\\_eletrica/historia\\_energia\\_eletrica.asp](http://www.institutoedp.com.br/institutoedp/pesquisadores_estudantes/energia_eletrica/historia_energia_eletrica/historia_energia_eletrica.asp). Acesso: 24 nov 2011.

JEREMIAS, Thiago; DECKER, Ildemar C. e; AGOSTINI, Marcelo N. Implementação de uma Barra Virtual de Referência Angular para a Visualização de Sincrofasores. In: **XXII CRICTE – Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica**. Joinville, SC. Nov. 2009.

JEREMIAS, Thiago. **Estudo, Manutenção e Desenvolvimento de Aplicações de Medição Fasorial Sincronizada em Sistemas de Energia Elétrica**. Universidade Federal de Santa Catarina. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCC). Florianópolis, SC. Nov. 2009.

KATAYAMA, Tohru. **Subspace Methods for System Identification**. USA: Springer, 2005.

KIMBARK, Edward W. **Power System Stability Volume I – Elements of Stability Calculations**. New York, USA: John Wiley & Sons, 1948.

KLUMP, R. WILSON, R. E. and MARTIN, K. E. Visualizing Real-Time Security Threats Using hybrid SCADA/PMU Measurement Displays. **Proceedings of the 38<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences**. Hawaii, USA. 2005.

KOSTEREV, D.; ESZTERGALYOS, J.; STIGERS, C. Feasibility study of using syn-chronized phasor measurements for generator dropping controls in the colstrip system. In: **IEEE - Transactions on Power Systems**, v. 13, n. 3, p. 755–761, August 1998.

KOSTEREV, D. Hydro turbine-governor model validation in pacific northwest. In: **IEEE - Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 2, p. 1144–1149, May 2004.

KUNDUR, P. *et al.* **Definition and classification of power system stability**. IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 3, p. 1387–1401, Aug. 2004.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York, USA: McGraw-Hill Professional, 1994.

LAN, D; TIANSHU, B and DAONONG, Z. Transmission Line Parameters Identification Based on Moving-Window TLS and PMU Data. In: **International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)**, v.3, p. 2187-2191. Oct. 2011.

LARSSON, Mats and REHTANZ, Christian. Predictive Frequency Stability Control based on Wide-area Phasor Measurements. In: **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**. Jul, 2002.

LATHI, B.P. **Linear Systems and Signals**. 2.ed. Oxford University Press. 2004.

LE FU Pal; Bikash C. and; CORY, Brian J. Phasor Measurement Application for Power System Voltage Stability Monitoring. In: **IEEE Power and Energy Society General Meeting**. Ago, 2008.

LI, Chunyan *et al.* An On-Line Transient Stability Emergency Control Strategy Based on PMU Forecasted Trajectory. In: **Power Engineering Conference, 2007**. IPEC 2007. International, p.307-312. May, 2008.

LIRA, Ricardo. **Influência dos Canais de Instrumentação na Exatidão da Medição Fasorial Sincronizada**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, SC. abr. 2010.

LIU, Guoping; QUINTERO, Jaime and; VENKATASUBRAMANIAN, Vaithianathan “Mani”. Oscillation monitoring system based on wide area synchrophasors in power systems. In: **Bulk Power System**

**Dynamics and Control – VII.** Revitalizing Operational Reliability, iREP Symposium. p. 1 – 13, Charleston, SC, USA, ago. 2007.

LIU, Guoping, VENKATASUBRAMANIAN, Vaithianatham M and CARROL, James R. Oscillation Monitoring System using Synchrophasors. In: **Power & Energy Society General Meeting**, p. 1-4, Jul. 2009.

LIU, Zhijian *et al.*. Toward PMU-based robust automatic voltage control (AVC) and automatic flow control (AFC). In: **Power and Energy Society General Meeting**, 2010 IEEE, p1-8. set. 2010.

LYONS, Richard G. **Understanding Digital Signal Processing**. 2. ed. Prentice Hall PTR. 2004.

MARCUS, Marvin e MINC, Henryk. **A Survey of Matrix Theory and Matrix Inequalities**. Courier Dover Publications. 1969.

MARTINEZ, C.; PARASHAR, M.; DYER, J. Wide area monitoring control phasor data requirements. In: **EIPP Real Time Task Team. White Paper DRAFT**, Dec. 2004.

MARTÍNEZ, Enrique and MESSINA, A.R. Modal Analysis of Measured Inter-Area Oscillations in the Mexican Interconnected System: The July 31, 2008 Event. In: **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, p.1-8. Jul.2011.

MESSINA, A. R. **Inter-area Oscillations in Power Systems: A Nonlinear and Nonstationary Perspective**. Springer Science Business Media. New York. 2009.

MONCHUSI, B.B. *et al.* **PMU based power system stability analysis**. In: TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference, p.1-5. Jan, 2009.

MORAES, Rui M e HU, Yi. Desafios na Utilização de PMUs Para Proteção e Controle em Sistemas de Potência. In: **X STPC Seminário Técnico de Proteção e Controle**. Out. 2010.

NAJAFI, M and KAZEMI, A. Coordination of PSS and FACTS Damping Controllers in Large Power Systems for Dynamic Stabilitu

Improvement. In: **PowerCon - Power System Technology**. 22-26 Oct. p. 1-6. 2006.

NASPI. **North American SynchroPhasor Initiative**. Disponível em: [www.naspi.org.br](http://www.naspi.org.br). Acesso: Abril de 2012.

NILSSON, N.E *et al.* Synchronous generator capability curve testing and evaluation. In : **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 9, n.1, p.414 – 424, Jan. 1994.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. Ed. São Paulo: Pearson, 2003.

OGATA, Katsuhiko. **Discrete-Time Control Systems**. 2. Ed. New Jersey: USA, Prentice Hall, p.215-225, 1995.

OLIVEIRA, Ricardo V.; RAMOS, Rodrigo A. e; BRETAS, Newton G. Controlador robusto multiobjetivo para o amortecimento de oscilações eletromecânicas em sistemas elétricos de potência. In: **Revista Controle & Automação**, São Carlos, SP, vol.16, n.3, jul, p. 290, USP-SC, 1995

ONS – Operador Nacional do Sistema. **IPDO – Informativo Preliminar Diário da Operação**. Disponível em: [www.ons.org.br/resultados\\_operacao/ipdo.aspx](http://www.ons.org.br/resultados_operacao/ipdo.aspx). Último acesso: Fev. 2012.

ONS – Operador Nacional do Sistema. **Mapas do SIN**. Disponível em: [http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/mapas\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx). Acesso: 25 nov. 2011.

ONS – Operador Nacional do Sistema. **Operação do SIN – Dados Relevantes 2011**. Disponível em: [http://www.ons.org.br/download/biblioteca\\_virtual/publicacoes/dados\\_relevantes\\_2011/index.html](http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/dados_relevantes_2011/index.html). Acesso: Ago. 2012.

ONS – Operador Nacional do Sistema. **SINDAT – Dados Técnicos do SIN**. Disponível em: [www.ons.org.br/conheca\\_sistema/dados\\_tecnicos.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/dados_tecnicos.aspx). Acesso: 20 jun. 2011.

ONS – Operador Nacional do Sistema . **Sistemas Especiais de Proteção – SEP e Proteções Sistêmicas da Interligação Acre – Rondônia**, Relatório de Implantação RE 3-028/2009. ONS 2009.

OSIsoft. **PI System software**. Disponível em:  
[http://www.osisoft.com/software-support/products/PI\\_WebParts.aspx](http://www.osisoft.com/software-support/products/PI_WebParts.aspx).  
Último acesso: Nov.2011.

PARTINGTON, J.R. **An introduction to Hankel operators. LMS Student Texts 13**. Cambridge University Press, 1988.

PHADKE, A.; THORP, J. S.; KARINI, K. State estimation with phasor measurements. In: **International Conference on Power System Technology**, v. 1, n. 1, p. 1–5, October 2006.

PHADKE, Arun.G. and THORP, James S. **Synchronized Phasor Measurements and Their Applications**. New York: Springer, 2008.

PIERRE, John W.; TRUDNOWSKI, Daniel J. and DONNELLY, Matthew K. Inicial Results in Eletromechanical Mode Identification from Ambient Data. In: **IEEE Transactions on Power Systems**, v.12, n.13, p.1245-1251. Aug. 1997.

PRIOSTE, Fernando B. **Detecção e Controle de Oscilações Eletromecânicas usando sistemas de Medição Fasorial Sincronizada**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. Ago, 2011.

PRIOSTE, Fernando B; SILVA, Aguinaldo S. and DECKER, Ildemar C.. Monitoring Oscillations Modes of the Brazilian Interconnected Power System Using Ambient Data. In : **IEEE PES Trondheim PowerTech**, Jun. 2011.

Projeto MedFasee. **Site Oficial projeto MedFasee**. Disponível em:  
[www.medfasee.ufsc.br](http://www.medfasee.ufsc.br).

PsyMetrix. **Wide Area Solutions**. Disponível em:  
[www.psymetrix.com/hot-topics/wide-area-solutions.html](http://www.psymetrix.com/hot-topics/wide-area-solutions.html). Último acesso: Nov.2011.

RAUHALA, Tuomas *et al.* Applications of phasor measurement units and wide-area measurement system in Finland. In: **IEEE PowerTech 2011**. Trondheim, Noruega. p. 1-8. Jun. 2011.

SAADAT, Hadi. **Power System Analysis**. USA: McGraw-Hill, 1999.

SANTOS, Moisés M. **Análise da Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Usando Dados de Medição Fasorial Sincronizada**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Mar. 2008.

SANTOSO, S; POWERS, E.J and GRADY, W.M. Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods. In: **IEEE Transactions on Power Delivery**. V.12, n.3, p. 1250-1257, Jul. 1997.

SARKAR, Tapan K. and PEREIRA, Odilon. Using the Matrix Pencil Method to Estimate the Parameters of a Sum of Complex Exponentials. In: **Antennas and Propagations Magazine, IEEE**. V.37, n.1, p. 48 – 55, Feb. 1995.

SCALA, M. L.; BENEDICTIS, M. D.; BRUNO, S.; GROBOVOY, A.; BONDAREVA, N.; BORODINA, N.; DENISOVA, D.; GERMOND, A.; CHERKAOUI, R. Develop-ment of applications in WAMS and WACS: an international cooperation experience. In: **IEEE - Power Engineering Society General Meeting**, p. 18–22, June 2006.

SEP/ONS. **Sistemas Especiais de Proteção – SEP**: Proteções Sistêmicas da Interligação Acre – Rondônia. Relatório de Implantação ONS RE 3-028/2009.

SHI, B.; XIE, X.; HAN, Y. Wams-based load shedding for systems suffering Power deficit. In: **IEEE/PES - Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific**, p. 1–6, 2005.

SHYNK, J.J *et al.* Frequency-Domain and Multirate Adaptive Filtering. **IEEE Signal Processing Magazine**, vol. 9, no. 1, pp. 14-37, Jan. 1992.

SILVA, Aguinaldo S. **Fundamentos de Controle Clássico**. Notas de Aula de EEL 7063 – Sistemas de Controle. Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

SILVEIRA, E. G. **Localização de Faltas em Linhas de Transmissão: Desenvolvimento de Novos Algoritmos e Implementação de Sistema Computacional para Aplicações Práticas**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2007.

SIMÕES COSTA, Antônio e ALBUQUERQUE, André. Inclusão de Medições Fasoriais na Estimção de Estados com Preservação da Estrutura dos Estimadores Convencionais. In: **XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. GOP 17. Out, 2011.

SIMÕES COSTA, Antônio and BEZ, Daniel M.. Enhanced Probabilistic Modeling of Phasor Measurement Errors in Hybrid SCADA-PMU State Estimation. In : **XII PMAPS International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems**. Istanbul, Turkey. 10-14 jun 2012.

STOTT, Brian. Power System Dynamic Response Calculations. In: Proceedings of IEEE. v.67, n.2, p.219-241, Feb.1979.

TIANSHU BI; XIAOHUI QIN; YANG, Q. Dynamic State Estimator with Phasor Measurements for Power System Electromechanical Transient Process. In: **Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09**. IEEE, 26-30 July 2009, p.1-5. 2009.

TREVISAN, Felipe. **Validação de Modelos de Unidades Geradoras Utilizando Simulação Dinâmica Híbrida Baseada em Sincrofasores**. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de Santa Catarina. 2011.

TRUDNOWSKI, Dan J.; JOHNSON, J.M. and; HAUER, John F. Making Prony Analysis More Accurate Using Multiple Signals. In: **IEEE Transactions on Power Systems**, v.14 n.1 p.226-231. Feb.1999.

VANFRETTI, Luigi *et al.* Application of Ambient Analysis Techniques for the Estimation of Electromechanical Oscillations from Measured PMU Data in Four Different Power Systems. In: **European**

**Transactions on Electrical Power**. Vol.21, n.4.p.1640-1656. May, 2011.

VAN OVERSCHEE, Peter and DE MOOR, Bart. **Subspace Identification for Linear Systems**. Belgium: Kluwer Academic Pub., 1996.

WANG, C.; JIA, Q.-Q.; LI, X.-B. et al. **Fault location using synchronized sequence measurements**. In: *Electrical Power and Energy Systems*, p. 134-139, June 2007

XIE, X. *et al.* WAMS applications in chinese power system. In: **IEEE power & energy magazine**, v.1, p.54-63, jun. 2006.

YI, K.; CHOO, J.; YOON, S.; LEE, T.; PARK, B.; NAM, H.; SONG, S.; SHIM, K. Development of wide area measurement and dynamic security assessment systems in korea. In: **IEEE - Power Power Engineering Society Summer Meeting**, v. 3, p. 1495–1499, 2001.

YINGTAO, W.; YONGHUA, Y.; JUNXIAN, H. Coordinated out-of-step protection system based on wams. In: **IEEE/PES - Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific**, 2005.

ZHAO, Qingsheng ; DONG, Jingyuan; XIA, Tao and LIU, Yilu. Detection of the start of frequency excursions in wide-area measurements. In: **Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**, 2008 IEEE, p.1-6. Ago, 2008.

ZHOU, M.; CENTENO, V.; THORP, J.; PHADKE, A. An alternative for including phasor measurements in state estimators. **IEEE Transactions on Power System**, v. 21, n. 4, p. 1930–1937, November 2006.

ZHOU, N.; HUANG,Z.;DOSIEK, L.; TRUDNOWSKI, D and PIERRE, J.W. Electromechanical mode shape estimation based on transfer function identification using PMU measurements. In : **Power & Energy Society General Meeting. PES'09 IEEE**. 26-30 July, 2009.

ZIERHOFER, C.M. Data Window With Tunable Side Lobe Ripple Decay. **In: IEEE Signal Processing Letters**. V.14, n.11, p.824-827. Nov, 2008.

ZIMMER, Valmor. **Detecção de Perturbações Sistêmicas Usando Dados de Medição Fasorial Sincronizada**. Dissertação de Mestrado (em andamento). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2012.

ZIMMER, Valmor; JEREMIAS, Thiago; DECKER, Ildemar C. e AGOSTINI, Marcelo N. Detecção de Perturbações Sistêmicas Usando Dados de Medição Fasorial Sincronizada. **XIX CBA – Congresso Brasileiro de Automática**. Campina Grande – PB. Set. 2012.

ZUO, J; CARROLL, R; TRACHIAN, P; et al. **Development of a TVA SuperPDC: Phasor Applications, tools, and Event Replay**. NASPI Blacksburg-VA. 2008.

## ANEXO A – Decomposição LQ

A decomposição LQ, descrita em Katayama (2011), é tipicamente utilizada em matrizes retangulares com um grande número de colunas e consiste em decompor a matriz em matrizes bloco triangulares inferior. Conforme mostrado na sequência.

$$\begin{bmatrix} U_{0|k-1} \\ Y_{0|k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{bmatrix}$$

Em que  $L_{11} \in \mathfrak{R}^{km \times km}$ ,  $L_{21} \in \mathfrak{R}^{kp \times km}$ ,  $L_{22} \in \mathfrak{R}^{kp \times kp}$  e  $L_{11}$  e  $L_{22}$  são triangulares inferiores.  $Q_1 \in \mathfrak{R}^{N \times km}$ ,  $Q_2 \in \mathfrak{R}^{N \times kp}$  são ortogonais.

A decomposição LQ é obtida fazendo a decomposição QR da matriz  $\begin{bmatrix} U_{0|k-1}^T & Y_{0|k-1}^T \end{bmatrix}$ .

Katayama (2011) apresenta um algoritmo em Matlab® para o cálculo da decomposição LQ.

```
% Decomposição LQ
function [L11,L21,L22]=lq(U,Y)
km=size(U,1); kp=size(Y,1);
[Q,L]=qr([U;Y]',0);
Q=Q'; L=L';
L11=L(1:km,1:km);
L21=L(km+1:km+kp,1:km);
L22=L(km+1:km+kp,km+1:km+kp);
```



## Apêndice A – Variáveis do DFAM

Este apêndice descreve aos programadores as variáveis armazenadas pelos arquivos “NOME.mat” criada cada vez que uma nova consulta é feita. Juntamente com a descrição, é apresentado um exemplo de aplicação dessa variável. Antes de iniciar defini-se a sigla (NP) como sendo o total de PMUs disponível no SPMS e contidas no arquivo “terminais.cfg”. Com isso, as variáveis são:

**SPMS\_nome** – Variável lida diretamente da primeira linha do arquivo “terminais.cfg” e identifica o nome do SPMS em questão. É utilizada no título da janela de funcionalidades utilizando o comando:

```
set(handles.text1, 'String', SPMS_nome)
```

**base\_modulo** – Variável que armazena as informações referentes as bases de tensão e corrente do terminal em questão. É uma matriz de dados lida do “terminais.cfg” e possui dimensão [NP x 2] em que as linhas indicam a PMU desejada, a 1ª coluna é a base de tensão e a segunda coluna é a base de corrente. Esta variável é utilizada nas esboços de tensão e corrente em PU.

```
H=plot(tempo, terminais_dados(i, :, 2) /  
        base_modulo(i, 1))
```

**descreve\_consulta** – Variável que armazena um breve texto escrito pelo usuário durante uma “Nova consulta”. Deve ser utilizada para lembrar ao usuário de que se trata aquele conjunto de dados. Esta variável é utilizada na primeira janela, no campo “Descrição”. O comando utilizado é apresentado na sequência.

```
set(handles.edit2, 'String', descreve_consulta)
```

**permite\_lista** – Variável que indica quais das PMUs contidas no arquivo “terminais.cfg” possuía o arquivo “.dat” disponível e seus dados foram carregados. É um vetor com dimensão [NP x 1], e possuirá valores 1 ou 0. 1 quanto a PMU estiver disponível para consulta e 0 quando o terminal não estiver disponível. Esta variável é utilizada no preenchimento do campo “TERMINAIS” na janela de funcionalidades, sempre que possuir um 0, este terminal será sinalizado como [Sem\_dados] e a seleção não será permitida.

```

        if permite_lista(i)==0;
terminal_nome_aux(i,1:length(strcat(terminal_nome(i
        ,:),'_[Sem dados]')))=
        strcat(terminal_nome(i,:),'_[Sem dados]')
        else

```

**taxa\_amos** – Indica a taxa de amostragem em que a busca foi feita ao PDC. É uma variável inteira, e utilizada, por exemplo, no cálculo da frequência e nos títulos dos gráficos, como mostrado no quadro seguinte.

```

        title(strcat('Tensão (FASE - A)', '
        [' ,num2str(taxa_amos), 'f/s]'));

```

**tem\_corrente** – Informa ao programa se o SPMS tem disponível a medida de corrente, e indica com 1 para sim e 0 para não. Utilizada para habilitar e desabilitar o esboço das curvas de corrente e fluxo de potência.

```

if tem_corrente==0 %se não tiver
    set(handles.checkbox14,'Enable','off')% P e Q
else
    set(handles.checkbox14,'Enable','on')
end

```

**tempo\_legenda** – É uma String que indica o tempo inicial das buscas. Possui a forma:

Tempo(s) - Início:dd/mm/aaaa hh:mm:ss (UTC - H)

É criado a partir do SOC do primeiro tempo, do primeiro arquivo lido, com o ajuste de fuso horário (H), para 0 em UTC, 2 – Horário brasileiro de verão e 3 – Horário oficial de Brasília. A escolha do fuso horário é feita durante o carregamento dos dados. Esta variável é utilizada principalmente no eixo “x” dos gráficos no tempo.

```

        xlabel(tempo_legenda)

```

**terminais\_qtde** – Armazena a quantidade de PMUs disponível no SPMS, esta variável possuirá o valor NP, e é utilizado para indicar o tamanho máximo dos vetores.

**terminal\_nome** – Armazena em um vetor de string o nome das PMUs disponíveis no arquivo “terminais.cfg”. Possui dimensão [NP x 1] e é utilizado para preencher a lista de terminais e nas legendas dos gráficos.

**terminais\_dados** – Pode ser considerado a matriz principal, neste estão disponíveis todos os dados lidos pelas PMUs e é uma matriz de três dimensões [NP x num\_dados x 14]. A primeira dimensão indica a PMU desejada, a segunda dimensão acessa a linha de dados em que cada linha possui um tempo e a terceira são as colunas com as grandezas. As grandezas são distribuídas em 14 colunas conforme mostrado na sequência.

Tempo	Mod. Va	Mod. Vb	Mod. Vc	Ang. Va	Ang. Vb	Ang. Vc	Mod. Ia	Mod. Ib	Mod. Ic	Ang. Ia	Ang. Ib	Ang. Ic	Faltante
-------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	----------

**terminais\_dados\_sp** – Armazena os valores calculados para a sequência positiva. Possui três dimensões [NP x num\_dados x 5], em que a primeira dimensão indica a PMU desejada, a segunda são os dados armazenados em linha e a terceira dimensão as grandezas, conforme apresentado na sequência. Note que a frequência do sistema está armazenado neste vetor.

Mod. Vsp	Ang. Vsp	Mod. Isp	Ang. Isp	Frequência
----------	----------	----------	----------	------------

**terminais\_dados\_s0** - Armazena os valores calculados para a sequência zero. Possui três dimensões [NP x num\_dados x 4], em que a primeira dimensão indica a PMU desejada, a segunda são os dados armazenados em linha e a terceira dimensão as grandezas. Conforme apresentado na sequência.

Mod. Vs0	Ang. Vs0	Mod. Is0	Ang. Is0
----------	----------	----------	----------

**terminais\_dados\_sn** - Armazena os valores calculados para a sequência negativa. Possui três dimensões [NP x num\_dados x 4], em que a primeira dimensão indica a PMU desejada, a segunda são os dados armazenados em linha e a terceira dimensão as grandezas. Conforme apresentado na sequência.

Mod. Vsn	Ang. Vsn	Mod. Isn	Ang. Isn
----------	----------	----------	----------



## Apêndice B – Arquivos de entrada

Os arquivos de entrada de dados podem ser de duas formas. Ambos precisam de um arquivo de dados para cada terminal, no intervalo desejado.

### Padrão 1: Formato “PMU.dat”

- Separação decimal por ponto (.)

1ª linha	Total de pontos					
2ª linha	Número da PMU	Canal	Tempo SOC	Módulo	Ângulo	Faltante
	DADOS					
Ultima linha	FIM					

Exemplo:

43200						
PMU	CANAL	TEMPO	MODULO	ANGULO	FALTANTE	
6	0	1280322900	213.088	-154.506		
6	0	1280322900.0167	213.059	-154.417		
6	0	1280322900.0333	213.036	-154.326		Tensão da Fase A
6	0	1280322900.05	213.043	-154.219		
		. . .				
6	1	1280322900	215.305	85.6412		
6	1	1280322900.0167	215.277	85.7279		
6	1	1280322900.0333	215.256	85.8175		Tensão da Fase B
6	1	1280322900.05	215.259	85.9243		
		. . .				
6	2	1280322900	211.848	-34.5868		
6	2	1280322900.0167	211.815	-34.4981		
6	2	1280322900.0333	211.789	-34.407		Tensão da Fase C
6	2	1280322900.05	211.793	-34.2977		
		. . .				
FIM						

Padrão 2: Formato “PMU.txt”

- Separação decimal por virgula (,)
- Não necessita do FIM.

Terminal: NOMEPMU							
Tensão base: 999 V							
SOC inicial: 9999999							
SOC final: 9999999,99							
Taxa: 99 fasores/s							
Total de frames faltantes: 99							
Tempo	Va_m	Va_a	Vb_m	Vb_a	Vc_m	Vc_a	Falta

## Exemplo:

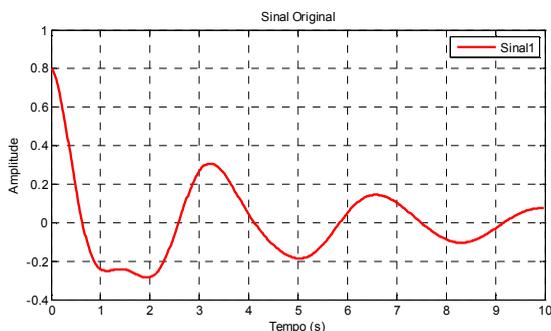
Terminal: UFC							
Tensão base: 220 V							
SOC inicial: 1332547200							
SOC final: 1332554399,9							
Taxa: 10 fasores/s							
Total de frames faltantes: 2							
Tempo_(SOC)	VA_mod_(V)	VA_ang_(graus)	VB_mod_(V)	VB_ang_(graus)	VC_mod_(V)	VC_ang_(graus)	Faltante
1332547200,0000	217,468994	79,700897	220,645996	-40,667000	218,014008	-161,056000	
1332547200,1000	217,485992	80,501701	220,630997	-39,869202	218,029999	-160,257996	
1332547200,2000	217,483002	81,351501	220,626007	-39,023300	218,016998	-159,408997	
		• • •					
1332554399,8000	217,442993	-10,016400	220,056000	-130,539993	217,509003	109,106003	
1332554399,9000	217,121002	-10,915300	219,830002	-131,362000	217,483002	108,224998	

## APENDICE C – Aplicação Numérica dos Métodos para Ringdown

Este apêndice tem como objetivo exemplificar a aplicação das metodologias de identificação de oscilações eletromecânicas durante o *ringdown*, de forma a permitir a observação da forma de construção das matrizes envolvidas. Para isto, criou-se um sinal com características de *ringdown* com características conhecidas.

O sinal criado, para representar um transitório do sistema possui as características da tabela seguinte e está esboçado graficamente na sequência. Foi considerada uma taxa de amostragem de 60 pontos por segundo e uma janela de tempo de 10 segundos ( $N = 600$  pontos).

Componente <b>n</b>	Frequência <b>f</b>	Amortecimento <b><math>\xi</math></b>	Amplitude <b>Am</b>	Fase <b><math>\Phi</math></b>
1	0,30 Hz	10 %	0,10	0
2	0,63 Hz	15 %	0,15	0



Com este sinal é possível construir o vetor  $y(t)$  que representa os dados medidos por uma PMU, e que foi construído através da equação seguinte como sendo o somatório de funções seno amortecidas.

$$y(t) = \sum_{i=1}^n e^{-\xi_i 2\pi f_i t} \cdot Am_i \cdot \text{sen}(2\pi f_i t + \Phi_i) \quad \text{para } t = 0, \frac{1}{60}, \dots, \left(600 - \frac{1}{60}\right)$$

$$y(t) = [0,8 \ 0,7945 \ 0,7874 \ 0,7785 \ \dots \ 0,0755 \ 0,0754 \ 0,0752]_{1 \times 600}$$

## Método de Prony

De acordo com o algoritmo apresentado na Seção 3.7.1 para a aplicação do método de Prony são necessários os seguintes passos:

### 1. Definir a ordem $n$ do modelo.

De acordo com o proposto na Tabela 4.10 recomenda-se utilizar uma ordem de  $n = N/4$ , logo  $n = 600/4 = 150$ .

### 2. Definir os coeficientes a por (3.21)

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

$$\begin{bmatrix} -0.0596 \\ -0.0471 \\ \vdots \\ 0.0752 \end{bmatrix}_{450 \times 1} = \begin{bmatrix} -0.0719 & -0.0840 & \cdots & 0.8000 \\ -0.0596 & -0.0719 & \cdots & 0.7945 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.0754 & 0.0755 & \cdots & 0.0031 \end{bmatrix}_{450 \times 150} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{150} \end{bmatrix}_{150 \times 1}$$

A solução deste sistema possui mais equações do que incógnitas, logo deve ser solucionado por métodos técnicas de mínimos quadrados. A solução encontrada para este caso é o vetor  $a$  na sequência.

$$a = [0,0593 \ 0,0582 \ 0,0571 \ 0,0558 \dots \ 0,0305 \ 0,0344 \ 0,0386]_{1 \times 150}$$

### 3. Calcular os valores de $\lambda_i$ ( $i = 1, \dots, n$ ) solucionando (3.19)

$$z^n - (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \cdots + a_n z^0) = 0$$

A partir dos valores dos coeficientes  $a$  encontrados, monta-se o seguinte polinômio.

$$z^{150} - (0,0593 \cdot z^{149} + 0,0582 \cdot z^{158} + \cdots + 0,0386) = 0$$

A solução desta equação possui 150 raízes, nas quais se incluem:

$$\lambda = [1 \ 0.9964 \pm 0.0313i \ 0.9879 \pm 0.0653i \ \dots \ -0.9734 - 0.0407i]$$

### 4. Calcular os valores dos Resíduos por (3.17)

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \lambda_2^{N-1} & \cdots & \lambda_n^{N-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix}$$

Após encontrado os valores de  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, 150$ ), é possível encontrar os valores dos resíduos, solucionando o sistema linear seguinte.

$$\begin{bmatrix} 0,8 \\ 0,7945 \\ \vdots \\ 0,0752 \end{bmatrix}_{600 \times 1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 0,9964 + 0,0313i & \cdots & -0,9734 - 0,0407i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1^{599} & 0,9964 + 0,0313i^{599} & \cdots & -0,9734 - 0,0407i^{599} \end{bmatrix}_{600 \times 150} \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix}_{150 \times 1}$$

Ao efetuar esta operação apenas os 5 primeiros valores serão diferentes de 0.

$$R = [-0,004 \quad 0,25 \quad 0,25 \quad 0,15 \quad 0,15 \quad 0 \quad \dots \quad 0]_{1 \times 150}$$

##### 5. Encontrar as características do modo através da tabela Tabela 3.1.

Para isto são necessários os valores  $\lambda_i$  e os  $R_i$  ( $i = 1 \dots 150$ ) Observe-se que os dois maiores resíduos estão associados aqueles modos cujas características foram atribuídas ao sinal, sendo estes:

Modo	Modelo discreto	Modelo Contínuo
1	$0,9964 \pm 0,0313i$	$-0,19 \pm 1,88i$
2	$0,9879 \pm 0,0653i$	$-0,60 \pm 3,96i$

Os polos complexos são encontrados sempre aos pares, um conjugado do outro, desta forma a amplitude é atribuída metade a cada um, por isto para se ter a amplitude total do modo soma-se as duas parcelas. Aplicando as relações da Tabela 3.1 obtêm-se as características dos modos desejados, conforme apresentado na tabela seguinte.

Modo	[Am]	Freq	Amort	Fase
1	0,50	0,30	10	0
2	0,30	0,63	15	0

## Método HTLS

De acordo com o algoritmo apresentado na Seção 3.7.2, para aplicar o método HTLS são necessários os seguintes passos:

1. Montar a matriz de Hankel ( $H$ ) com dimensão  $L \times M$  definida pelo usuário em que  $M = N + 1 - L$ ,

Conforme recomendado na Tabela 4.10, deve-se montar a matriz de Hankel de forma a se ter  $M = L$ , que é obtido ao considerar  $L = \frac{N+1}{2}$

Desta forma,  $L = \frac{600+1}{2} = 300,5$ . Arredondando o valor faz-se  $L = 300$ ,  $M = 301$ . Para este caso tem-se a matriz de Hankel conforme matriz seguinte.

$$\begin{aligned}
 H &= \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{M-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{L-1} & y_L & \cdots & y_{N-1} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0,8 & 0,7945 & \cdots & -0,1852 \\ 0,7945 & 0,7874 & \cdots & -0,1853 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -0,1848 & -0,1852 & \cdots & 0,0752 \end{bmatrix}_{300 \times 301}
 \end{aligned}$$

2. Decompor a matriz  $H$  em valores singulares como (3.28);

$$\begin{aligned}
 H &= U_{300 \times 300} \cdot S_{300 \times 301} \cdot V_{301 \times 301}^T = \\
 &\begin{bmatrix} 0,0342 & 0,1283 & \cdots \\ 0,0377 & 0,1256 & \cdots \\ \cdots & \cdots & 0,0126 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 33,08 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 33,06 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix} \\
 &\begin{bmatrix} 0,0327 & 0,0283 & \cdots \\ 0,1286 & 0,1279 & \cdots \\ \cdots & \cdots & -0,0259 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

3. Definir a ordem  $n$ , com a tolerância para os valores singulares mais significativos, conforme (3.29)(3.29):

Os valores singulares encontrados foram:

$$\sigma = [33,08 \quad 33,06 \quad 7,30 \quad 6,04 \quad 1,04 \quad 0 \quad \dots \quad 0]$$

Para determinar a ordem, dividem-se os valores singulares pela maior deles, no caso 33,08, com isso resulta-se em:

$$\sigma_{normal} = [1 \quad 0,9996 \quad 0,2209 \quad 0,1825 \quad 0,0315 \quad 0 \quad \dots \quad 0]$$

Considerando apenas os  $n$  valores singulares cuja normalização seja maior que  $10^{-3}$ , tem-se que a ordem é  $n = 5$ .

4. Utilizar a matriz decomposta  $\hat{U}$  em (3.30), para solucionar a equação (3.32), e obter os valores de  $\lambda$ :

Como a ordem do modelo é  $n = 5$ , deve-se considerar apenas as 5 primeiras linhas e colunas de  $U$ , e resolver o sistema conforme segue.

$$\hat{U}_{\uparrow} = \hat{U}_{\downarrow} \tilde{Z} \rightarrow Z = \hat{U}_{\uparrow}^{\dagger} \cdot \hat{U}_{\downarrow}$$

Onde ( $\dagger$ ) indica matriz pseudoinversa,  $\uparrow$  indica a exclusão da primeira linha e  $\downarrow$  indica a exclusão da última linha. Com isso monta-se o sistema seguinte:

$$\begin{bmatrix} 0,0377 & 0,1256 & \dots & 0,0541 \\ 0,0412 & 0,1227 & \dots & 0,043 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0,0477 & 0,1166 & \dots & 0,0433 \end{bmatrix}_{4 \times 5} = \begin{bmatrix} 0,0342 & 0,1283 & \dots & 0,0579 \\ 0,0377 & 0,1256 & \dots & 0,0541 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0,0445 & 0,1197 & \dots & 0,0467 \end{bmatrix}_{4 \times 5} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_5 \end{bmatrix}_{5 \times 1}$$

A solução deste sistema resulta nos polos do sistema, apresentados na sequência.

$$\lambda = \begin{bmatrix} 0,9879 \pm 0,0653i \\ 0,9964 \pm 0,0313i \\ 1 \end{bmatrix}$$

Com isso, observa-se que os modos encontrados são os mesmos identificados pelo método de Prony e o procedimento para cálculo dos resíduos é análogo.

Modo	Modelo discreto	Modelo Contínuo
1	$0,9879 \pm 0,0653i$	$-0,60 \pm 3,96i$
2	$0,9964 \pm 0,0313i$	$-0,19 \pm 1,88i$

### Método Feixe de Matrizes

1. Montar a matriz de Hankel  $Y$ , com número de coluna  $M + 1$  definido pelo usuário, (3.35);

Neste caso tem-se que o número de pontos do intervalo  $N = 600$ , para definir o número de colunas ( $M + 1$ ) desta matriz recomenda-se um valor entre  $N/3$  e  $N/2$ . Para este caso será escolhido um valor de  $M = 250$ , resultando em uma matriz com 251 colunas. Por consequência, esta matriz terá dimensão em linhas de  $L = 350$  linhas.

$$Y = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \cdots & y(M) \\ y(1) & y(2) & \cdots & y(M+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-M-1) & y(N-M) & \cdots & y(N-1) \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,7945 & \cdots & -0,0174 \\ 0,7945 & 0,7874 & \cdots & -0,0231 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -0,0099 & -0,0041 & \cdots & 0,0752 \end{bmatrix}_{350 \times 251}$$

2. Decompor a matriz  $Y$  em valores singulares, (3.36) e definir a ordem  $n$  do modelo análogo ao método HTLS.

Decompondo a matriz  $Y$  em valores singulares, tem-se:

$$Y = [\hat{U} \quad U_0] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\Sigma} & 0 \\ 0 & \Sigma_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V} \\ V_0 \end{bmatrix}^*$$

$$Y = U_{350 \times 350} \cdot S_{350 \times 351} \cdot V_{251 \times 251}^T =$$

$$\begin{bmatrix} -0.1115 & -0.0691 & \dots & \dots \\ -0.1077 & -0.0716 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0.4547 & \dots \\ \dots & -0.1145 & -0.1152 & \dots \\ \dots & -0.0760 & -0.0714 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -0.0072 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 33,0330 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 32,0685 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Os valores singulares encontrados são:

$$\sigma = [33,03 \quad 32,06 \quad 7,25 \quad 6,03 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0]$$

Para determinar a ordem, dividem-se os valores singulares pela maior deles, no caso 33,08, com isso resulta-se em:

$$\sigma_{normal} = [1 \quad 0,97 \quad 0,21 \quad 0,1826 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0]$$

Considerando apenas os  $n$  valores singulares cuja normalização seja maior que  $10^{-3}$ , tem-se que a ordem é  $n = 4$ .

3. Construir a matriz  $\hat{Y}$ , com a tolerância estipulada para os valores singulares, (3.29) e (3.37):

Considerando então as  $n$  colunas de  $U$ , as  $n$  linhas e  $n$  colunas de  $\hat{\Sigma}$  e as  $n$  linhas de  $V$ , é possível então construir a matriz  $\hat{Y}$ .

$$\hat{Y} = \hat{U}_{350 \times 4} \hat{\Sigma}_{4 \times 4} \hat{V}_{4 \times 251}^T$$

$$\hat{Y} = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \dots & y(M) \\ y(1) & y(2) & \dots & y(M+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-M-1) & y(N-M) & \dots & y(N-1) \end{bmatrix}_{350 \times 251}$$

$$\hat{Y} = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,7945 & \dots & -0,0174 \\ 0,7945 & 0,7874 & \dots & -0,0231 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -0,0099 & -0,0041 & \dots & 0,0752 \end{bmatrix}_{350 \times 251}$$

Observe-se que esta reconstrução resultou em uma matriz  $\hat{Y} = Y$ , isto ocorreu porque o sinal não possui ruídos e todos os valores singulares não nulos foram considerados.

4. Construir as matrizes  $Y_1$  e  $Y_2$  a partir de  $\hat{Y}$ , (3.38) e (3.39):

Para a montagem de  $Y_1 = \hat{Y}^{\rightarrow}$  deve-se excluir a última coluna de  $\hat{Y}$  e para montar a matriz  $Y_2 = \hat{Y}^{\leftarrow}$  deve-se excluir a primeira coluna de  $\hat{Y}$ .

5. Determinar os valores de  $\lambda$  por (3.48).

Por esta equação ( $\dagger$ ) indica a pseudoinversa e a função  $eig( )$  representa o cálculo dos autovalores.

$$\lambda = \text{autovalores}(Y_1^{\dagger}Y_2)$$

Solucionando esta equação obtêm-se resultados idênticos ao método de Prony e HTLS, como apresentado na tabela seguinte.

Modo	Modelo discreto	Modelo Contínuo
1	$0,9879 \pm 0,0653i$	$-0,60 \pm 3,96i$
2	$0,9964 \pm 0,0313i$	$-0,19 \pm 1,88i$

As características dos modos são obtidas pelas equações da Tabela 3.1.