

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Rodolfo Bialecki Leandro

**IDENTIFICAÇÃO EM TEMPO REAL DE OSCILAÇÕES
ELETROMECAÑICAS UTILIZANDO SINCROFASORES**

Florianópolis

2014

Rodolfo Bialecki Leandro

**IDENTIFICAÇÃO EM TEMPO REAL DE OSCILAÇÕES
ELETROMECCÂNICAS UTILIZANDO SINCRÓFASORES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ildemar Cassana Decker, D.Sc.

Coorientador: Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.

Florianópolis

2014

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

Leandro, Rodolfo Bialecki

Identificação em tempo real de oscilações eletromecânicas
utilizando sincrofasores / Rodolfo Bialecki Leandro ;
orientador, Ildemar Cassana Decker ; coorientador,
Aguinaldo Silveira e Silva. - Florianópolis, SC, 2014.
118 p.

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

Inclui referências

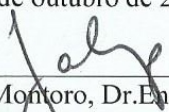
1. Engenharia Elétrica. 2. Sistemas de energia
elétrica. 3. Medição fasorial sincronizada. 4. Oscilações
eletromecânicas. I. Decker, Ildemar Cassana. II. e Silva,
Aguinaldo Silveira. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
IV. Título.

Rodolfo Bialecki Leandro


**IDENTIFICAÇÃO EM TEMPO REAL DE OSCILAÇÕES
ELETROME CÂNICAS UTILIZANDO SINCROFASORES**

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

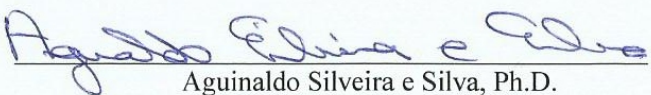
Florianópolis, 10 de outubro de 2014.



Carlos Galup-Montoro, Dr.Eng.
Coordenador do Curso

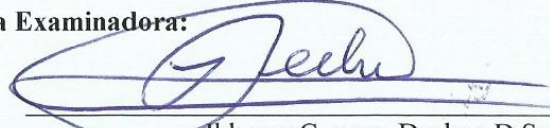


Ildemar Cassana Decker, D.Sc.
Orientador



Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.
Coorientador

Banca Examinadora:



Ildemar Cassana Decker, D.Sc.
Presidente



Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D.



Marcelo Neujahr Agostini, D.Eng.



Ricardo Vasques de Oliveira, D.Eng.

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz Antonio e Adda.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Luiz Antonio e Adda, por me transmitirem as mais importantes lições da vida com muito amor. Aos meus irmãos, Ricardo e Rafaela, pelo carinho e amizade de sempre. A toda a minha família pelo incentivo constante.

À minha namorada, Patrícia Pauletto, por seu amor e dedicação em todos os momentos compartilhados e por sua compreensão e paciência nos momentos em que estive ausente.

Aos professores Ildemar Cassana Decker e Aguinaldo Silveira e Silva pela orientação precisa durante todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca de avaliação, Professor Antonio José Alves Simões Costa e Professor Ricardo Vasques de Oliveira pelas ricas contribuições para o aperfeiçoamento do trabalho e, em especial, a Marcelo Neujahr Agostini, cujas contribuições ocorreram ao longo de todo o período de mestrado.

A todos os colegas do LabPlan, especialmente, Alexandre Fürstenberger, Daniel Tenfen, Fábio Matheus Mantelli, Carlos Arturo Rodriguez Ayola, Geyson Brustollin, Juan David Caicedo Aristizábal, Marcelo Azevedo Benetti, Marcelo Marcel Cordova, Marco Antonio Delgado Zarzosa, Murilo Reolon Scuzziato, Paulo André Sehn da Silva, Paulo Larroyd, Pedro César Cordeiro Vieira, Thiago Jeremias e Valmor Zimmer, pelo companheirismo e apoio em todos os momentos.

Aos amigos da graduação, Alan Dorneles Callegaro, Jones Cambuzzi, Marcello Costa Maccarini, Roberto Felício dos Santos, Samuel Thomae e Silvio Rotilli Filho, pela amizade sempre presente.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelos ensinamentos essenciais ao desenvolvimento deste trabalho e de muitos que ainda estão por vir.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Resumo

Neste trabalho descreve-se a implementação de técnicas de identificação de sistemas e processamento de sinais em um aplicativo computacional desenvolvido para o monitoramento em tempo real de modos de oscilações eletromecânicas em Sistemas de Energia Elétrica (SEE). Essas técnicas empregam apenas medidas de entrada e saída dos sistemas na estimação de suas características modais, independentemente da modelagem matemática dos SEE.

Duas técnicas baseadas em medidas foram implementadas: o método de Welch e o método de subespaço de estados CCA. O método de Welch fornece uma estimativa do espectro de frequências dos sinais formados pelo conjunto de medidas extraídos do sistema, permitindo a identificação das frequências de oscilação dos modos dominantes. O método de subespaço de estados CCA permite a obtenção de um modelo em espaço de estados, a partir do qual, realizando uma análise modal, pode-se extrair as frequências e taxas de amortecimento dos modos de oscilação.

O aplicativo computacional integrado desenvolvido para a aplicação das técnicas de estimação foi escrito em linguagem computacional C#, considerando princípios básicos de modelagem orientada a objetos e padrões de projeto. O projeto e a implementação computacional do aplicativo são descritos no decorrer do trabalho.

O aplicativo foi testado no monitoramento de modos eletromecânicos de um sistema-teste e do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro, utilizando sincrofasores do sistema de medição fasorial sincronizada MedFasee BT. Os resultados apresentados mostram a efetiva identificação dos modos de oscilação monitorados com a determinação das respectivas frequências e taxas de amortecimento.

Palavras-chave: Oscilações eletromecânicas, monitoramento em tempo real, sincrofasores.

Abstract

This work describes the implementation of system identification and signal processing techniques in a computational application developed for the real-time monitoring of electromechanical modes in power systems. These techniques use only input and output measurements to estimate system's modes, having no need of mathematical modelling. Two of these measurement-based techniques were implemented in this work: Welch's method and the subspace method CCA. Welch's method provides a spectral estimation, allowing the identification of the dominant modes frequencies. The subspace method CCA builds a state-space model from which one can extract modes' frequencies and damping ratios by applying modal analysis.

The integrated computational application developed to apply the estimation techniques was written with C# language, making use of object oriented modelling and design patterns basic concepts. The project and the computational implementation are described in the course of this work.

The computational application was tested for monitoring electromechanical modes of a test-system and of the Brazilian Interconnected Power System (BIPS) using synchrophasors from the MedFasee BT synchronized phasor measurement system. Results show the effective identification of the monitored oscillation modes with the determination of the respective frequencies and damping ratios.

Keywords: Electromechanical oscillations, real-time monitoring, synchrophasors.

Lista de Figuras

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Estrutura básica dos SPMS. | 25 |
| Figura 2 | SPMS MedFasee BT. | 26 |
| Figura 3 | Classificação dos métodos de estimação de modos eletromecânicos | 41 |
| Figura 4 | Segmentação no sinal. | 44 |
| Figura 5 | Representação de um sistema estocástico em espaço de estados. | 47 |
| Figura 6 | Diagrama ilustrativo do aplicativo de monitoramento. | 54 |
| Figura 7 | Tipos de comunicação via UDP. | 55 |
| Figura 8 | Estrutura comum dos <i>frames</i> | 56 |
| Figura 9 | PMU medindo grandezas de mais de uma LT em uma subestação. | 59 |
| Figura 10 | Exemplo de arquivo de configuração de fluxo de dados. | 59 |
| Figura 11 | Opções de gráficos no aplicativo desenvolvido. | 61 |
| Figura 12 | Blocos de pré-processamento. | 62 |
| Figura 13 | Exemplo de <i>outlier</i> em um sinal. | 62 |
| Figura 14 | Espectro de frequências com predominância de modos de baixas frequências. | 64 |
| Figura 15 | Representação de um filtro FIR de ordem M | 65 |
| Figura 16 | Filtragem FIR com a utilização de FFT. | 65 |
| Figura 17 | formato da janela Hanning. | 66 |
| Figura 18 | Verificação cruzada entre resultados dos métodos de identificação. | 71 |
| Figura 19 | Padrão Singleton. | 75 |
| Figura 20 | Padrão Strategy. | 76 |
| Figura 21 | Diagrama de classes - <i>Frames</i> | 78 |
| Figura 22 | Classe SPMS. | 79 |
| Figura 23 | Diagrama de atividades da identificação de modos de oscilação no aplicativo. | 82 |
| Figura 24 | Estratégias de estimação de modos de oscilação. | 83 |
| Figura 25 | Sistema-teste. | 85 |
| Figura 26 | Ambiente de geração de dados de sistema-teste. | 87 |
| Figura 27 | Sinal monitorado no Caso I. | 89 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Figura 28 | Espectro de frequências dos primeiros 5 minutos do sinal monitorado no Caso I. | 90 |
| Figura 29 | Sinal monitorado no Caso II. | 94 |
| Figura 30 | Espectro de frequências dos primeiros 5 minutos do sinal monitorado no Caso II. | 94 |
| Figura 31 | Sinal monitorado no Caso III. | 95 |
| Figura 32 | Ambiente de geração de dados do SPMS MedFasee BT. | 97 |
| Figura 33 | Sinal para o monitoramento do modo Norte-Sul. | 99 |
| Figura 34 | Frequência estimada do modo Norte-Sul. | 99 |
| Figura 35 | Taxa de amortecimento estimada do modo Norte-Sul. | 100 |
| Figura 36 | Sinais para o monitoramento do modo Norte-Sul. | 101 |
| Figura 37 | Frequência estimada do modo Norte-Sul. | 101 |
| Figura 38 | Taxa de amortecimento estimada do modo Norte-Sul. | 101 |
| Figura 39 | Diferenças angulares entre as formas modais dos sinais. | 102 |
| Figura 40 | Sinal para o monitoramento do modo Acre/Rondônia-SIN. | 103 |
| Figura 41 | Frequência estimada do modo Acre/Rondônia-SIN. | 104 |
| Figura 42 | Taxa de amortecimento estimada do modo Acre/Rondônia-SIN. | 104 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tabela 1 | Campos comuns a todos os <i>frames</i> | 56 |
| Tabela 2 | Estrutura dos <i>frames</i> de configuração. | 57 |
| Tabela 3 | Estrutura dos <i>frames</i> de dados. | 58 |
| Tabela 4 | Características modais obtidas com o PacDyn. | 87 |
| Tabela 5 | Resultados encontrados variando o número de linhas de blocos nas matrizes de Hankel do método CCA. | 90 |
| Tabela 6 | Resultados encontrados variando a ordem do modelo. | 91 |
| Tabela 7 | Número de segmentos utilizados nas simulações. | 93 |
| Tabela 8 | Resultados encontrados variando o tamanho da janela de análise. | 93 |
| Tabela 9 | Resultados de estimação para o Caso II. | 95 |
| Tabela 10 | Resultados de estimação para o Caso III. | 96 |
| Tabela 11 | Principais modos interárea no SIN. | 97 |
| Tabela 12 | Tabela síntese dos resultados do monitoramento do modo Norte-Sul. | 103 |
| Tabela 13 | Resultados do monitoramento do modo Acre/Rondônia-SIN. | 105 |
| Tabela 14 | Influência da variação de parâmetros dos métodos de identificação no desempenho computacional do aplicativo. | 106 |
| Tabela 15 | Influência do número de sinais utilizados no desempenho computacional do aplicativo. | 106 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | | |
|---------|---|----|
| SEE | Sistemas de Energia Elétrica | 23 |
| SPMS | <i>Synchronized Phasor Measurement Systems</i> | 24 |
| PMU | <i>Phasor Measurement System</i> | 24 |
| PDC | <i>Phasor Data Concentrator</i> | 24 |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> | 25 |
| LabPlan | Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia E- létrica | 26 |
| UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina | 26 |
| ONS | Operador Nacional do Sistema | 26 |
| SIN | Sistema Interligado Nacional | 26 |
| DFT | <i>Discrete Fourier Transform</i> | 42 |
| FFT | <i>Fast Fourier Transform</i> | 42 |
| HTLS | <i>Hankel Total Least Squares</i> | 45 |
| YW | <i>Yule-Walker</i> | 46 |
| AR | <i>autoregressive</i> | 46 |
| ARMA | <i>autoregressive moving average</i> | 46 |
| CCA | <i>Canonical Correlation Analysis</i> | 46 |
| CVA | <i>Canonical Variate Analysis</i> | 46 |
| N4SID | Numerical algorithm for Subspace State Space System IDentification | 46 |
| UDP | <i>User Datagram Protocol</i> | 54 |
| TCP | <i>Transmission Control Protocol</i> | 54 |
| IP | <i>Internet Protocol</i> | 55 |
| SOC | <i>Second Of Century</i> | 56 |
| UTC | <i>Universal Time Coordinated</i> | 56 |
| ASCII | <i>American Standard Code for Information Interchange</i> .. | 57 |
| LT | Linha de Transmissão | 58 |
| SNR | <i>Signal-to-Noise Ratio</i> | 63 |
| CAG | Controle Automático de Geração | 64 |
| FIR | <i>Finite Impulse Response</i> | 64 |
| IDM | Índice de Dominância Modal | 69 |
| MOO | Modelagem Orientada a Objetos | 73 |

| | | |
|-------|--|----|
| UML | <i>Unified Modeling Language</i> | 77 |
| CEPEL | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica..... | 86 |

Sumário

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 23 |
| 1.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA .. | 24 |
| 1.1.1 O SPMS MedFasee BT | 26 |
| 1.2 OBJETIVOS | 27 |
| 1.3 ESTRUTURA DO TEXTO | 27 |
| 2 ESTABILIDADE ANGULAR A PEQUENAS PERTURBAÇÕES | 31 |
| 2.1 INTRODUÇÃO | 31 |
| 2.2 MODOS DE OSCILAÇÕES ELETROMECCANICAS | 31 |
| 2.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE ANGULAR A PEQUENAS PERTURBAÇÕES | 32 |
| 2.3.1 Representação em espaço de estados | 33 |
| 2.3.2 Autovalores da matriz de estados | 34 |
| 2.3.3 Autovetores da matriz de estados | 35 |
| 2.3.4 Relação entre representação em espaço de estados e funções de transferência | 35 |
| 2.4 COMENTÁRIOS FINAIS | 37 |
| 3 ESTIMAÇÃO DE MODOS ELETROMECCANICOS BA- SEADA EM MEDIDAS | 39 |
| 3.1 INTRODUÇÃO | 39 |
| 3.2 CONCEITOS GERAIS | 39 |
| 3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO | 41 |
| 3.3.1 Métodos não-paramétricos | 42 |
| 3.3.1.1 Método de Welch | 43 |
| 3.3.2 Métodos paramétricos | 45 |
| 3.3.2.1 Formulação dos métodos de subespaço de estados | 47 |
| 3.4 COMENTÁRIOS FINAIS | 51 |
| 4 PROJETO DO APLICATIVO COMPUTACIONAL .. | 53 |
| 4.1 INTRODUÇÃO | 53 |
| 4.2 ARQUITETURA DO APLICATIVO DESENVOLVIDO | 53 |
| 4.2.1 Aquisição | 54 |
| 4.2.2 Interpretação | 55 |
| 4.2.3 Organização | 58 |
| 4.2.4 Monitoramento de grandezas fasoriais | 60 |
| 4.2.5 Identificação de modos de oscilação | 61 |
| 4.2.5.1 Pré-processamento dos sinais temporais | 62 |
| 4.2.5.1.1 Tratamento de outliers | 62 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 4.2.5.1.2 | <i>Remoção da média</i> | 63 |
| 4.2.5.1.3 | <i>Filtragem</i> | 63 |
| 4.2.5.1.4 | <i>Dizimação</i> | 66 |
| 4.2.5.2 | Aplicação das metodologias de identificação | 67 |
| 4.2.5.2.1 | <i>Método de Welch</i> | 68 |
| 4.2.5.2.2 | <i>Método de CCA</i> | 68 |
| 4.2.5.3 | Verificação cruzada | 70 |
| 4.3 | COMENTÁRIOS FINAIS | 71 |
| 5 | MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL | 73 |
| 5.1 | INTRODUÇÃO | 73 |
| 5.2 | PARADIGMA DA MODELAGEM ORIENTADA A OBJETOS | 73 |
| 5.2.1 | Padrões de projeto | 74 |
| 5.2.1.1 | Padrão Singleton | 75 |
| 5.2.1.2 | Padrão Strategy | 75 |
| 5.3 | PLATAFORMA DE DESENVOLVIMENTO | 76 |
| 5.4 | ARQUITETURA COMPUTACIONAL DO APLICATIVO | 77 |
| 5.4.1 | Aquisição | 77 |
| 5.4.2 | Interpretação | 78 |
| 5.4.3 | Organização | 79 |
| 5.4.4 | Monitoramento de grandezas fasoriais | 80 |
| 5.4.5 | Identificação de modos de oscilação | 81 |
| 5.5 | COMENTÁRIOS FINAIS | 83 |
| 6 | EXPERIMENTOS E RESULTADOS | 85 |
| 6.1 | INTRODUÇÃO | 85 |
| 6.2 | EXPERIMENTOS COM DADOS DE SISTEMA-TESTE | 85 |
| 6.2.1 | Ambiente de geração de dados | 86 |
| 6.2.2 | Metodologia | 87 |
| 6.2.3 | Resultados | 88 |
| 6.2.3.1 | Caso I | 88 |
| 6.2.3.1.1 | <i>Número de linhas de blocos nas matrizes de Hankel - método CCA</i> | 89 |
| 6.2.3.1.2 | <i>Ordem definida para o modelo estimado - método CCA</i> | 91 |
| 6.2.3.1.3 | <i>Tamanho da janela de dados</i> | 92 |
| 6.2.3.2 | Caso II | 93 |
| 6.2.3.3 | Caso III | 95 |
| 6.3 | EXPERIMENTOS COM DADOS DO SPMS MEDFASEE BT | 96 |
| 6.3.1 | Ambiente de geração de dados | 96 |
| 6.3.2 | Metodologia | 97 |

| | |
|---|-----|
| 6.3.3 Resultados - Modo Norte-Sul | 99 |
| 6.3.3.1 Análise monossinal | 99 |
| 6.3.3.2 Análise multissinal | 100 |
| 6.3.3.3 Síntese dos resultados | 102 |
| 6.3.4 Resultados - Modo Acre/Rondônia-SIN | 103 |
| 6.4 DESEMPENHO COMPUTACIONAL | 105 |
| 6.4.1 Influência dos parâmetros de entrada dos métodos . | 105 |
| 6.4.2 Influência do número de sinais utilizados | 106 |
| 6.5 COMENTÁRIOS FINAIS | 107 |
| 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS | |
| FUTUROS | 109 |
| 7.1 CONCLUSÕES | 109 |
| 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 111 |
| REFERÊNCIAS | 113 |

1 INTRODUÇÃO

O problema de estabilidade em Sistemas de Energia Elétrica (SEE) tem reconhecida importância na operação de SEE desde que os primeiros geradores síncronos foram interconectados para aumentar a capacidade e a confiabilidade no suprimento de energia elétrica [1, 2]. As primeiras definições de estabilidade de SEE estavam relacionadas à capacidade de manutenção de sincronismo entre as máquinas geradoras do sistema após uma perturbação. Assim, dizia-se que um SEE apresentava estabilidade transitória se, após uma perturbação, as máquinas síncronas continuassem operando em paralelo e com as mesmas velocidades [3].

À medida que os SEE evoluíram com o aumento das interconexões, a utilização de novas tecnologias e controles, e a operação sob condições cada vez mais perto dos limites, devido a restrições econômicas e ambientais, novos problemas de estabilidade de sistemas elétricos de grande porte ganharam importância. Por exemplo, o problema de estabilidade angular a pequenas perturbações e os problemas de estabilidade de tensão e de frequência [4].

O problema de estabilidade angular envolve o estudo das oscilações eletromecânicas, fenômenos de ocorrência natural nos SEE originados por diferentes formas de interação entre as máquinas síncronas que compõem o sistema [2, 5]. O conhecimento preciso das características das oscilações eletromecânicas fornece informações essenciais acerca das condições de estabilidade dos SEE [6], permitindo a sintonização de controladores responsáveis pela eliminação dessas oscilações. Dessa forma, as corretas identificação e caracterização dessas oscilações são primordiais para a manutenção da segurança dinâmica dos sistemas.

Tradicionalmente, estudos de estabilidade angular dependiam da modelagem matemática de SEE. Ou seja, um modelo matemático era construído conectando os modelos dos geradores aos modelos das li-

nhas de transmissão e esses aos modelos das cargas [7]. Com o modelo matemático completo do sistema realizavam-se simulações a fim de verificar as condições de estabilidade para diversos tipos de perturbações.

No entanto, a precisão das estimativas depende da precisão do modelo matemático construído. No caso do blecaute do dia 10 de agosto de 1996 na costa oeste dos Estados Unidos [8], o modelo mostrou-se inadequado sob as condições que resultaram no evento [5]. Com isso, as simulações realizadas não indicaram a falta de amortecimento que resultou em oscilações crescentes resultando na atuação de esquemas de proteção e no conseqüente colapso do sistema.

Frente às dificuldades relatadas pela abordagem tradicional de estimação modal, nas duas últimas décadas, várias técnicas de identificação de sistemas e processamento de sinais vêm sendo desenvolvidas para a estimação dos modos de oscilação a partir de medidas dos sistemas. Esses métodos beneficiam-se do fato de que não necessitam de um modelo detalhado do sistema, consistindo em uma interessante alternativa à abordagem clássica de estimação dos modos [5, 9, 10].

O desenvolvimento dessas técnicas foi impulsionado pela crescente implementação de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS – *Synchronized Phasor Measurement Systems*) em diversos países. As medidas fasoriais sincronizadas (sincrofasores) fornecidas por esses sistemas permitem o monitoramento da dinâmica dos SEE, possibilitando a extração dos melhores desempenhos das técnicas de processamento de sinais e identificação de sistemas em análises modais.

1.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

Os SPMS, desenvolvidos ao longo das últimas duas décadas, são reconhecidos como uma das ferramentas essenciais aos centros de controle atuais dos SEE. Os SPMS são compostos basicamente por unidades de medição fasorial (PMUs – *Phasor Measurement Units*) conectadas a um Concentrador de Dados Fasoriais (PDC – *Phasor Data Concentrator*) por meio de canais de comunicação [11]. A estrutura

básica dos SPMS pode ser visualizada na Figura 1.

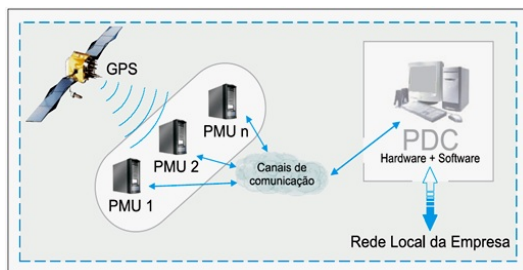


Figura 1 – Estrutura básica dos SPMS [12].

A PMU é o elemento base dos SPMS, responsável por realizar a aquisição de grandezas fasoriais diretamente na forma de fasores sincronizados no tempo (sincrofasores). A fonte de sincronização mais comumente utilizada pelas PMUs é o sinal temporal fornecido pelo GPS (*Global Positioning System*), devido à alta precisão (1 microssegundo ou superior). Além da sincronização temporal, a alta taxa de aquisição (até 60 fasores por segundo) é uma característica importante das medições realizadas pelas PMUs.

Os sincrofasores são enviados pelas PMUs por meio de canais de comunicação até o PDC. Como todas as medidas recebem etiquetas de tempo na fonte de medição, a velocidade de transmissão dos canais de comunicação não é um parâmetro crítico para a integridade dos dados. Ou seja, atrasos na transmissão não comprometem o trabalho do PDC de organizar os dados recebidos, já que o alinhamento das medidas é feito baseado nas etiquetas de tempo atribuídas às medidas pelas PMUs [13]. Além de receber e organizar as medidas segundo suas etiquetas de tempo, o PDC é responsável pelo armazenamento e pela disponibilização dos dados para aplicações *off-line* e em tempo real.

Os registros fasoriais dos SPMS vêm sendo utilizados em inúmeras aplicações, tais como: análise de perturbações, identificação de oscilações, validação de modelos de simulação, estimação de estados, localização de faltas e várias outras aplicações de monitoramento, proteção

e até mesmo controle [13].

1.1.1 O SPMS MedFasee BT

O SPMS MedFasee BT faz parte dos desenvolvimentos do Projeto MedFasee, iniciado em 2003 no Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LabPlan) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com o objetivo de desenvolver a tecnologia de medição fasorial no Brasil [14, 15]. O SPMS MedFasee BT possui uma rede de PMUs instaladas em universidades do país monitorando a rede elétrica a partir de medições em baixa tensão. Atualmente, o sistema conta com 23 PMUs enviando seus registros fasoriais ao PDC instalado no LabPlan, em Florianópolis. Na Figura 2 pode-se visualizar a localização das PMUs que compõem o SPMS MedFasee BT.

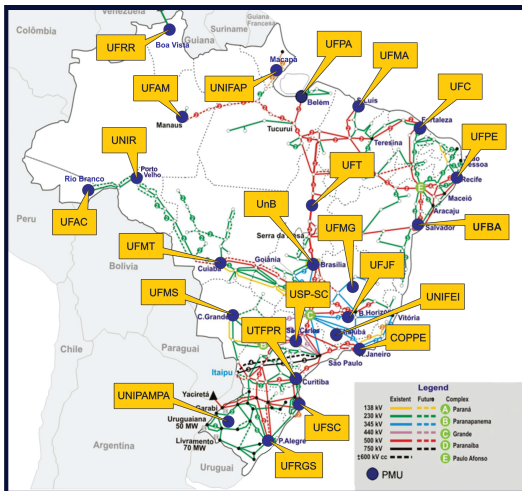


Figura 2 – SPMS MedFasee BT.

Os dados deste sistema vêm sendo utilizados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) desde o ano de 2009 (com estabelecimento de uma parceria formal em 2011) em análises *post-mortem* de grandes perturbações e outros eventos no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Neste trabalho, os registros fasoriais do SPMS MedFasee BT foram empregados para a aplicação de técnicas de identificação de sistemas e processamento de sinais no monitoramento de oscilações eletromecânicas no SIN.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de metodologias e ferramentas computacionais para o monitoramento e a identificação, em tempo real, de modos de oscilações eletromecânicas com a utilização de sincrofasores.

A metodologia utilizada para a obtenção desse objetivo é constituída dos seguintes itens:

- Implementar em um aplicativo computacional a aquisição e a interpretação em tempo real de pacotes de medidas fasoriais.
- Implementar e avaliar diferentes metodologias de identificação de sistemas e processamento de sinais em aplicações de monitoramento de modos de oscilações eletromecânicas em SEE.
- Realizar o monitoramento de modos de oscilações eletromecânicas em um sistema-teste através de simulações e no SIN através de registros fasoriais reais do SPMS MedFasee BT.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

Os capítulos seguintes a este estão organizados da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** *Estabilidade angular a pequenas perturbações.* Os principais conceitos acerca dos modos de oscilações eletromecânicas são apresentados, bem como, suas classificações. Além disso, apresenta-se a teoria de análise de estabilidade angular a pequenas perturbações utilizada na caracterização dos modos de oscilação de um SEE.

- **Capítulo 3:** *Estimação de modos eletromecânicos baseada em medidas.* Neste capítulo são abordadas as principais metodologias de identificação de sistemas utilizadas na caracterização de modos de oscilações eletromecânicas em SEE. Os métodos são classificados como paramétricos e não-paramétricos e os conceitos principais das duas classes são expostos. Além disso, apresentam-se as formulações de dois métodos de identificação implementados neste trabalho.
- **Capítulo 4:** *Projeto do Aplicativo Computacional.* No capítulo 4 discute-se o projeto de um aplicativo computacional de monitoramento em tempo real da dinâmica de SEE com a utilização de sincrofasores. Nesse sentido, expõem-se as técnicas utilizadas nos diversos processos realizados pelo aplicativo, desde a aquisição das grandezas fasoriais em tempo real à aplicação dos métodos de identificação de modos de oscilações eletromecânicas.
- **Capítulo 5:** *Modelagem e Implementação Computacional.* A implementação computacional do projeto de aplicativo de monitoramento exposto no Capítulo 4 é descrita. Para isso, são apresentados conceitos de Modelagem Orientada a Objetos e de padrões de projeto. O projeto de aplicativo computacional implementado é detalhado, com a descrição das principais classes e seus relacionamentos.
- **Capítulo 6:** *Experimentos e Resultados.* Primeiramente, são realizados experimentos com sinais de um sistema-teste, para que se possa validar as metodologias de identificação e verificar a influência de certos parâmetros na qualidade dos resultados. Na sequência, o aplicativo desenvolvido é utilizado em análises de registros fasoriais reais, para o acompanhamento de dois modos de oscilações eletromecânicas interárea do SIN. Os resultados encontrados com os experimentos são apresentados e discutidos. Há também uma seção tratando especificamente

do desempenho computacional do aplicativo.

- **Capítulo 7:** *Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.* No capítulo 7 estão reunidas as principais conclusões obtidas com a realização do trabalho. Além disso, listam-se sugestões para o desenvolvimento de novos trabalhos na mesma linha de pesquisa.

2 ESTABILIDADE ANGULAR A PEQUENAS PERTURBAÇÕES

2.1 INTRODUÇÃO

Os SEE estão entre os sistemas dinâmicos mais complexos criados pelo homem [6, 16]. A natureza dinâmica dos SEE é não-linear, ditada por conjuntos de equações diferenciais ordinárias de 2^a ordem. No entanto, para estudos de estabilidade a pequenas perturbações é possível linearizar esse conjunto de equações em torno de um ponto de operação. A partir do modelo linearizado pode-se então empregar análise modal para a caracterização das oscilações eletromecânicas do sistema.

Neste capítulo apresenta-se a classificação tradicional das oscilações eletromecânicas, levando em conta as interações que as originam. Na sequência apresenta-se a análise modal de sistemas linearizados construídos para estudos de estabilidade a pequenas perturbações. A formulação apresentada permite a caracterização das oscilações eletromecânicas por meio de suas frequências de oscilação e taxas de amortecimento.

2.2 MODOS DE OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS

Basicamente, os modos que ditam as oscilações eletromecânicas são classificados em três categorias, de acordo com o tipo de interação entre as máquinas síncronas que os originam¹:

- **Modos intraplanta:** relacionados a oscilações entre máquinas de uma mesma usina, situam-se na faixa de frequências de 2 a 2,5 Hz;

¹Existem ainda as classes de modos torsionais e de controle, que não fazem parte do escopo deste trabalho. Detalhes acerca dessas classes também podem ser obtidos em [2].

- **Modos locais:** geralmente com frequências na faixa de 1 a 2 Hz [17], ocorrem devido a oscilações entre uma ou mais máquinas de uma usina e as demais usinas da mesma área ou do sistema;
- **Modos interárea:** associados a oscilações entre o conjunto de máquinas de uma área e um ou mais conjuntos de máquinas de outras áreas do sistema. Por envolverem grandes inércias as frequências observadas são baixas, na ordem de 0,2 a 1,0 Hz [17].

A descrição completa de um modo de oscilação é composta, além de sua frequência de oscilação, pelo seu amortecimento e forma modal (*mode-shape*) [1, 2]. Os valores de frequência e amortecimento dos modos são indicadores muito úteis acerca das condições operativas dos SEE [6, 18], em geral decaindo em condições de maior estresse [19]. Quando a transferência de potência entre áreas do sistema é muito alta ou a capacidade da rede é reduzida, por exemplo, o amortecimento do modo de oscilação interárea relacionado pode cair drasticamente resultando em oscilações crescentes. Um famoso exemplo prático desse cenário, muito utilizado na literatura, é o do blecaute do dia 10 de agosto de 1996 na costa oeste dos Estados Unidos [8].

Devido ao fato de que os SEE são constantemente excitados por pequenas variações aleatórias da carga, os modos de oscilação não podem ser diretamente medidos, mas sim estimados [20]. Tradicionalmente, a estimação dos modos de oscilação baseia-se na análise modal de modelos linearizados dos sistemas, construídos para estudos de estabilidade angular a pequenas perturbações.

2.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE ANGULAR A PEQUENAS PERTURBAÇÕES

A teoria utilizada para a obtenção dos modos de oscilação que caracterizam um sistema linearizado sob a forma de espaço de estados

é apresentada nesta seção, podendo ser encontrada em [1, 2].

2.3.1 Representação em espaço de estados

Os SEE são sistemas de comportamento dinâmico altamente complexo, apresentando elevado grau de não-linearidades. No entanto, em análises de estabilidade a pequenas perturbações, representa-se o SEE como um conjunto de equações diferenciais linearizadas em torno de um ponto de operação, conforme:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta \mathbf{u}, \quad (2.1a)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}\Delta \mathbf{u}, \quad (2.1b)$$

onde:

$\Delta \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estados;

$\Delta \mathbf{y} \in \mathbb{R}^l$ é o vetor de saída;

$\Delta \mathbf{u} \in \mathbb{R}^r$ é o vetor de entrada;

$\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ é a matriz de estados;

$\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times r}$ é a matriz de entrada;

$\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{l \times n}$ é a matriz de saída;

$\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{l \times r}$ é a matriz que define a proporção da entrada que aparece diretamente na saída.

Aplicando a transformada de Laplace em (2.1a) e (2.1b), obtêm-se as equações de estado no domínio da frequência:

$$s\Delta \mathbf{x}(s) - \Delta \mathbf{x}(0) = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x}(s) + \mathbf{B}\Delta \mathbf{u}(s), \quad (2.2a)$$

$$\Delta \mathbf{y}(s) = \mathbf{C}\Delta \mathbf{x}(s) + \mathbf{D}\Delta \mathbf{u}(s). \quad (2.2b)$$

Rearranjando a Equação (2.2a), obtém-se:

$$\Delta \mathbf{x}(s) = \frac{\text{adj}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}{\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})} [\Delta \mathbf{x}(0) + \mathbf{B}\Delta \mathbf{u}(s)]. \quad (2.3)$$

Substituindo esse resultado na Equação (2.2b), obtém-se

$$\Delta \mathbf{y}(s) = \mathbf{C} \frac{adj(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}{det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})} [\Delta \mathbf{x}(0) + \mathbf{B}\Delta \mathbf{u}(s)] + \mathbf{D}\Delta \mathbf{u}(s). \quad (2.4)$$

Os polos de $\Delta \mathbf{x}(s)$ e $\Delta \mathbf{y}(s)$ são as raízes da equação:

$$det(s\mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0. \quad (2.5)$$

Os valores de s que satisfazem a Equação (2.5) são os autovalores de \mathbf{A} . Analisar a estabilidade a pequenas perturbações de um SEE, corresponde a analisar os autovalores da matriz \mathbf{A} .

2.3.2 Autovalores da matriz de estados

Os autovalores da matriz \mathbf{A} são os valores λ para os quais existem soluções não-triviais (ou seja, com $\phi \neq 0$) na seguinte equação:

$$\mathbf{A}\phi = \lambda\phi. \quad (2.6)$$

Para sistemas físicos, como um SEE, a matriz \mathbf{A} é real. Com isso, seus autovalores podem ser números reais, ou pares de números complexos conjugados. Autovalores reais representam modos não-oscilatórios, enquanto autovalores dados por pares de complexos conjugados representam modos oscilatórios [2].

Para um autovalor λ representado por um par de complexos conjugados na forma:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega. \quad (2.7)$$

A frequência de oscilação, em Hertz, do modo é obtida a partir da componente imaginária do autovalor, por meio de:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (2.8)$$

A taxa de amortecimento do modo pode ser encontrada utilizando:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{(\sigma)^2 + (\omega)^2}}. \quad (2.9)$$

Pela Equação (2.9), constata-se que autovalores com parte real negativa representam oscilações amortecidas, enquanto que autovalores com parte real positiva representam oscilações de amplitude crescente.

2.3.3 Autovetores da matriz de estados

Para qualquer autovalor λ_i , o vetor-coluna ϕ_i que satisfaz a Equação (2.6) é chamado de “autovetor a direita” de \mathbf{A} associado ao autovalor λ_i . O autovetor a direita ϕ_i possui a seguinte forma, sendo n a ordem do sistema:

$$\phi_i = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Os elementos dos autovetores a direita fornecem a atividade das variáveis de estado quando o modo associado ao autovetor é excitado. As magnitudes relativas dos elementos de ϕ_i fornecem as intensidades das atividades das variáveis de estado no i -ésimo modo, enquanto que os ângulos dos elementos fornecem os deslocamentos de fase das variáveis de estado com respeito ao modo.

2.3.4 Relação entre representação em espaço de estados e funções de transferência

A representação em espaço de estados trata não apenas das propriedades de entrada e saída de um sistema mas de seu comportamento interno completo. Diferentemente, a representação de função de transferência especifica apenas o comportamento de entrada/saída do sistema. Nesse sentido, a representação em espaço de estados é uma descrição mais completa do sistema [2]. No entanto, para estudos de controle o interesse está na elaboração de uma função de transferência de malha aberta entre variáveis específicas.

A fim de observar a relação entre a matriz de estados, e seus

autovalores e autovetores, com a função de transferência entre y e u , as Equações (2.1a) e (2.1b) são reescritas como:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{b}\Delta u, \quad (2.11a)$$

$$\Delta y = \mathbf{c}\Delta \mathbf{x}. \quad (2.11b)$$

onde \mathbf{A} é a matriz de estados, $\Delta \mathbf{x}$ é o vetor de estados, Δu é uma entrada única, Δy é uma saída única, \mathbf{c} é um vetor linha e \mathbf{b} é um vetor coluna. Assume-se que y não é uma função direta de u , ou seja, na Equação (2.1a) $\mathbf{D} = 0$.

A função transferência do sistema representado por (2.11a) e (2.11b) é dada por [2, 21]:

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \mathbf{c}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{b}. \quad (2.12)$$

Realizando a expansão em frações parciais dessa função transferência e utilizando as propriedades da matriz de estados, obtém-se a seguinte representação:

$$G(s) = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i}, \quad (2.13)$$

onde o resíduo R_i de $G(s)$ relacionado a λ_i é obtido por:

$$R_i = \mathbf{c}\phi_i\psi_i\mathbf{b}, \quad (2.14)$$

sendo ϕ_i e ψ_i os autovetores à direita e à esquerda associados a λ_i [2].

Pode-se ver que os polos de $G(s)$ são dados pelos autovalores de \mathbf{A} (caso não ocorram cancelamentos entre polos e zeros na função de transferência). Essa relação entre a representação em espaço de estados e funções de transferência é útil para métodos de identificação de modos de oscilação que não obtêm a matriz de estados do sistema propriamente dita, mas apenas os resíduos complexos relacionados aos autovalores da matriz de estados (Equação (2.14)). Um exemplo são os métodos de reconstrução de sinais, que utilizam esses resíduos para

reconstruir os sinais em análise (mais detalhes acerca dos métodos de identificação são apresentados no Capítulo 3).

Basicamente, esse processo de reconstrução de sinais por meio dos resíduos apoia-se na seguinte formulação. Ao aplicar um impulso na entrada do sistema representado por (2.11a) e (2.11b), as m saídas são dadas por:

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^n R_i e^{\lambda_i t} \quad j = 1, \dots, m \quad (2.15)$$

Mesmo que a entrada não seja um impulso, por exemplo, no caso de um degrau, a resposta linearizada dos sistema será uma soma de exponenciais. A forma discreta da Equação (2.15), considerando $y(t)$ amostrada a períodos constantes Δt , é dada por:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n R_i z_i^k \quad (2.16)$$

onde $z_i = e^{\lambda_i \Delta t}$ [21].

2.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as características principais dos modos eletromecânicos em SEE. Além disso, foram mostradas as ferramentas de sistemas lineares empregadas para a análise modal da matriz de estados de sistemas representados sob a forma de espaço de estados. Essas técnicas conduzem à obtenção de importantes informações acerca dos modos de oscilação presentes em SEE. No capítulo seguinte as técnicas apresentadas são revisitadas para a identificação de modos eletromecânicos unicamente a partir de medidas do sistema.

3 ESTIMAÇÃO DE MODOS ELETROMECHANICOS BASEADA EM MEDIDAS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo as técnicas de identificação de modos eletromecânicos baseadas em medidas são discutidas. Primeiramente, as técnicas são classificadas. A seguir, apresentam-se as características dos grupos de técnicas classificadas. Além disso, duas técnicas, implementadas neste trabalho, têm seus algoritmos apresentados.

3.2 CONCEITOS GERAIS

A partir da análise de modelos em espaço de estados linearizados, pode-se obter as características modais de um sistema, conforme apresentado no Capítulo 2. Basicamente, dois caminhos podem ser seguidos para a construção desses modelos. O primeiro consiste na modelagem matemática do SEE, ou seja, por meio das equações diferenciais (domínio de tempo contínuo) ou das equações de diferenças (domínio de tempo discreto) que regem os sistemas. Esses modelos são tão precisos quanto complexos, pois levam em conta muitos aspectos do sistema sendo modelado [22].

O segundo caminho baseia-se em técnicas de identificação de sistemas, que consistem na modelagem de sistemas dinâmicos por meio de observação de medidas do sistema (entradas e/ou saídas). Ou seja, uma série de dados é monitorada, um certo modelo parametrizado é pré-definido e valores numéricos adequados são atribuídos a esses parâmetros para que se possa chegar o mais perto possível dos dados registrados. Nesse sentido, a identificação de sistemas é o análogo dinâmico do ajuste de curvas (*curve fitting*). Essas técnicas admitem perdas em precisão nos resultados em troca de grandes ganhos em simplificação na obtenção dos modelos [22].

Além da identificação de sistemas por meio de modelos parametrizados obtidos através de dados do sistema, técnicas de processamento de sinais compõem o arcabouço de métodos de estimação de modos eletromecânicos baseados em medidas. Com essas técnicas é possível realizar análises de correlação ou estimação espectral [23], permitindo a obtenção de características importantes acerca dos modos eletromecânicos dominantes de um SEE.

A aplicação de todas essas técnicas de estimação de modos eletromecânicos baseadas em medidas deve considerar a natureza estocástica dos SEE, uma vez que esses sistemas são continuamente excitados por entradas aleatórias. Em razão dessa natureza estocástica, nenhum algoritmo pode estimar exatamente as propriedades modais de um sistema a partir de um conjunto finito de medidas. Sempre haverá um erro associado à estimativa [17].

Além disso, o desempenho dessas técnicas depende da disponibilidade e da qualidade das medidas empregadas. Neste sentido, a utilização de sincrofasores constitui-se em uma excelente alternativa [19]. No entanto, para a obtenção de bons resultados nas estimações, deve-se escolher a metodologia mais adequada de acordo com o período de dados disponíveis em análise, que pode ser de dados de grandes perturbações (*ringdown*) ou de dados de ambiente (*ambient data*). Os primeiros períodos são aqueles subsequentes à ocorrência de uma perturbação expressiva no sistema elétrico, como uma perda de geração/carga ou o desligamento de uma linha de transmissão. Os períodos de dados de ambiente correspondem à operação normal do sistema, nos quais observam-se apenas pequenas variações aleatórias na carga do sistema [17].

A identificação de modos de oscilação em períodos de dados de grandes perturbações já é um tema razoavelmente consolidado [17], sendo o método de Prony [24] o mais utilizado ao longo dos anos neste tipo de análise. Por outro lado, a identificação de modos de oscilação em períodos de dados de ambiente ainda se encontra em desenvolvimento por se tratar de um problema mais complexo.

A análise de sinais em períodos de dados de ambiente revela a presença de um ruído ambiente de nível constante no sistema. A hipótese considerada é que esse ruído é resultado de pequenas variações na carga, que agem como excitação de baixa amplitude aos modos eletromecânicos do sistema. Assumindo que essas variações sejam modeladas como ruído branco em uma janela de análise é possível estimar as características modais dos sistemas a partir dos sinais de dados de ambiente [25].

3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO

Apesar de ser comum classificar os métodos de identificação seguindo o critério de aplicabilidade – em períodos de dados de grandes perturbações e dados de ambiente – pode-se levar em conta outros fatores, como a abordagem de resolução do problema, conforme adotado em [26]. Nesse caso, os métodos de identificação são classificados basicamente como paramétricos e não-paramétricos. A Figura 3 mostra alguns dos métodos empregados na estimação de modos eletromecânicos de acordo com essa classificação.

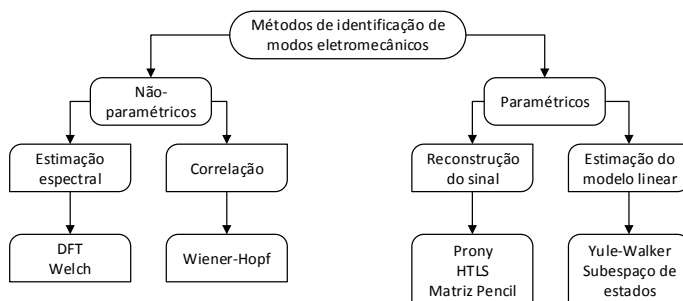


Figura 3 – Classificação dos métodos de estimação de modos eletromecânicos. Adaptado de [26].

3.3.1 Métodos não-paramétricos

Os métodos não-paramétricos são bons pontos de partida para uma primeira verificação dos modos de oscilação presentes nos sinais em análise. Esses métodos não fazem quaisquer hipóteses acerca do modelo que representa o sistema em estudo e, por isso, são muito robustos [17]. É interessante utilizar os resultados de métodos não-paramétricos para uma verificação cruzada com os resultados obtidos pela estimação de modos por meio de métodos paramétricos [9].

Os métodos não-paramétricos podem atuar tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. No domínio do tempo a análise é realizada diretamente no conjunto de medidas obtidas do sistema enquanto que a análise no domínio da frequência requer o cálculo de funções de densidade espectral [5]. O método não-paramétrico com mais ampla utilização em trabalhos relacionados à estimação de oscilações eletromecânicas é o método de Welch [27], com o qual podem ser obtidas as funções de densidade espectral dos sinais. Uma desvantagem do método é que não se obtém qualquer estimativa sobre o amortecimento dos modos de oscilação [6, 17].

Outros métodos não-paramétricos aplicados em identificação de modos de oscilação em SEE são a tradicional Transformada Discreta de Fourier (DFT - *Discrete Fourier Transform*) [28], a Transformada de Wavelet [29] e a Transformada de Hilbert [30]. Todas essas técnicas trabalham no domínio da frequência, decompondo os espectros dos sinais analisados. A DFT decompõe o sinal em uma soma de senóides, sendo a simples e rápida implementação, por meio do algoritmo de FFT (*Fast Fourier Transform*), sua principal vantagem. A Transformada de Wavelet decompõe o sinal em termos de uma “função-mãe” escolhida previamente e tem como vantagem em relação à DFT o fornecimento de informações temporais de surgimento e desaparecimento de oscilações nos sinais em análise [31]. A Transformada de Hilbert decompõe o sinal em funções que representam oscilações variantes no tempo, com isso, pode ser empregada em estudos de sinais não-estacionários.

Além dessas técnicas de estimação espectral, técnicas de filtragem podem ser empregadas, como no caso de análises por meio das equações de Wiener-Hopf [32]. Neste caso, um “filtro branqueador” (*whitening filter*) é construído utilizando como entrada um período de dados de ambiente para resolver as equações de predição linear de Wiener-Hopf. As raízes dominantes do filtro são as estimativas dos modos do sistema [25].

Neste trabalho o método de Welch foi implementado para a verificação cruzada com os resultados da estimação por um método paramétrico de subespaço de estados (apresentado mais adiante na seção 3.3.2). O algoritmo implementado para o método de Welch é apresentado a seguir.

3.3.1.1 Método de Welch

O método de Welch apresentado em [27] é descrito como um algoritmo para o cálculo da densidade espectral de sinais pela aplicação do algoritmo de FFT. Para isso, o método envolve o seccionamento do sinal em análise, o cálculo de periodogramas modificados das seções e a média desses periodogramas modificados [23].

Considere-se a amostra de dados $y(j)$, $j = 0, 1, \dots, N - 1$ de uma sequência estacionária, estocástica, de segunda ordem. Divide-se essa sequência em segmentos de comprimento L , com seus inícios separados por D amostras, sendo $D \leq L$. Ou seja, admite-se sobreposição entre segmentos adjacentes, conforme mostrado na Figura 4 [27]. Considerando K segmentos tem-se:

$$y_1(j) = y(j), \quad j = 0, \dots, L - 1. \quad (3.1a)$$

Da mesma forma:

$$y_2(j) = y(j + D), \quad j = 0, \dots, L - 1. \quad (3.1b)$$

Finalmente:

$$y_k(j) = y(j + (K - 1)D), \quad j = 0, \dots, L - 1. \quad (3.1c)$$

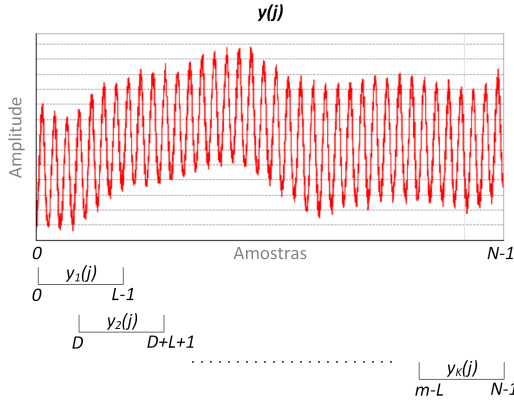


Figura 4 – Segmentação no sinal.

Para cada um desses segmentos de comprimento L calcula-se um periodograma modificado. Isto é, seleciona-se uma janela de dados com coeficientes $w(j)$, sendo $j = 0, \dots, L-1$; e formam-se as sequências $y_1(j)w(j), \dots, y_K(j)w(j)$. Então, obtém-se as transformadas de Fourier $A_1(n), \dots, A_K(n)$ dessas sequências por:

$$A_k(n) = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} y_k(j)w(j)e^{-2kijn/L}, \quad (3.2)$$

onde $i = (-1)^{1/2}$. Finalmente, os K periodogramas modificados são obtidos pela seguinte equação:

$$I_k(f_n) = \frac{L}{U} |A_k(n)|^2, \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad (3.3)$$

onde

$$f_n = \frac{n}{L}, \quad n = 0, \dots, L/2; \quad (3.4)$$

e

$$U = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} w^2(j). \quad (3.5)$$

Para a janela retangular, por exemplo, $U = 1$. A estimativa da densidade espectral é a média dos periodogramas obtidos e pode ser escrita como:

$$\hat{P}(f_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K I_k(f_n). \quad (3.6)$$

3.3.2 Métodos paramétricos

Os métodos paramétricos assumem um modelo para a representação do sistema em análise cujos parâmetros são estimados a partir de um conjunto de medidas do próprio sistema. Assim como na abordagem clássica de estimação dos modos de oscilação, parte-se da hipótese de que o sistema pode ser linearizado em torno de um ponto de operação para estudos de estabilidade a pequenas perturbações [5]. A diferença é que nesse caso não há a necessidade da modelagem matemática do sistema já que o modelo linear é obtido apenas através das medidas. Como parte-se geralmente de um longo conjunto de dados e estima-se alguns poucos parâmetros do modelo, esses métodos resultam em uma grande redução na quantidade de dados [9].

O método de Prony é o método paramétrico mais amplamente utilizado na estimação de modos de oscilação. O modelo admitido pelo método de Prony é uma soma de senóides amortecidas. Outros métodos que trabalham com esse modelo são o método da Matriz Pencil e o método HTLS (*Hankel Total Least Squares*) [21, 33]. O modelo de senóides amortecidas representa bem períodos de dados de grandes perturbações, no entanto, é inadequado em análises de dados de ambiente.

Os primeiros resultados da aplicação de métodos paramétricos na estimação de modos de oscilação em períodos de dados de ambi-

ente foram publicados em [25], no qual foi empregado um método da classe de métodos Yule-Walker (YW). Desde então, muitas variações dos métodos de YW vem sendo aplicadas na estimação dos modos de oscilações em SEE [9]. Esses métodos fazem uso de modelos autorregressivos (AR - *autoregressive*) simples ou com média móvel (ARMA - *autoregressive moving average*) para a representação dos sistemas.

Mais recentemente, a classe de métodos de subespaço de espaço de estados vem sendo aplicada na identificação de modos eletromecânicos em períodos de dados de ambiente. O nome “métodos de subespaço” remete ao fato de que as informações utilizadas por esses métodos na identificação de sistemas são obtidas a partir dos espaços linha e coluna de certas matrizes compostas por medidas de entrada e saída dos sistemas [22]. Os métodos de subespaço de estados têm como principais vantagens a simplicidade e robustez das técnicas matemáticas utilizadas em seus algoritmos, e a forma de representação em espaço de estados, muito conveniente para propósitos de controle do sistema estudado [9].

Uma das primeiras aplicações de um método de subespaço de estados nesse tipo de análise foi publicada em [34], com o emprego do método baseado em *Canonical Correlation Analysis* - CCA (também conhecida por *Canonical Variate Analysis* - CVA [35]). O *Numerical algorithm for Subspace State Space System IDentification* (N4SID) também tem sido aplicado com sucesso em períodos de dados de ambiente para obtenção de um modelo em espaço de estados do sistema [36].

Neste trabalho foi implementado um algoritmo do método de subespaço de estados CCA, para a identificação de modos de oscilação. Dessa forma, a formulação básica dos métodos de identificação por subespaço de estados, válida para o método de CCA e outros métodos de subespaço de estados, é apresentada com mais detalhes a seguir.

3.3.2.1 Formulação dos métodos de subespaço de estados

Em [22] foi proposto um teorema unificado para a formulação de vários métodos de subespaço, incluindo CCA, MOESP (*Multivariable Output-Error State sPace*), N4SID [37]. Essa formulação é válida para a identificação de sistemas puramente estocásticos (sem a presença de entradas externas). Nesse caso o vetor de entradas \mathbf{u} é nulo no sistema representado pelas equações (2.1a) e (2.1b). Considerando a ausência de entradas externas e admitindo o caráter estocástico do sistema, sua representação na forma discreta de espaço de estados pode ser escrita como [38]:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \quad (3.7a)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (3.7b)$$

onde $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ é o vetor de estados, $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^{l \times 1}$ é o vetor de saídas, $\mathbf{w}_k \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ e $\mathbf{v}_k \in \mathbb{R}^{l \times 1}$ são vetores de ruídos do processo e das medidas e \mathbf{A} e \mathbf{C} são matrizes com dimensões apropriadas. O problema de identificação de sistemas puramente estocásticos consiste na obtenção das matrizes do modelo discreto em espaço de estados (Equações (3.7a) e (3.7b)) utilizando apenas dados de saída do sistema [22, 37]. Uma representação gráfica do sistema estocástico é apresentada na Figura 5, onde o símbolo Δ representa um atraso.

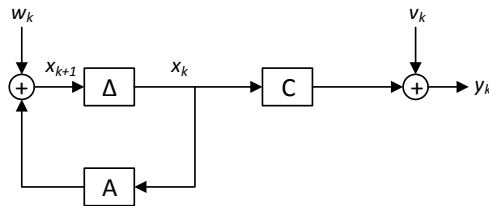


Figura 5 – Representação de um sistema estocástico em espaço de estados.

Não é o intuito desse texto apresentar todos os detalhes acerca da teoria de identificação de sistemas com o emprego de métodos de su-

bespaço de estados. Para aprofundamento no tema, sugere-se a leitura de [22, 39]. Neste texto apenas os principais passos para a resolução do problema de identificação são apresentados a seguir. O algoritmo apresentado e utilizado no trabalho é baseado em [36].

1. Considere-se uma sequência de vetores de saída y_0, y_1, \dots, y_M , onde $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^{l \times 1}$ para $k = 0, 1, \dots, M$. Com esses dados constroem-se as seguintes matrizes de bloco de Hankel estendidas (i é um inteiro pré-selecionado maior que n , j é determinado por $j = M - 2i + 2$):

$$\mathbf{Y}_p \equiv \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{j-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & \cdots & y_{i+j-2} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{li \times j}, \quad (3.8a)$$

$$\mathbf{Y}_f \equiv \begin{bmatrix} y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{li \times j}. \quad (3.8b)$$

2. Calcular a projeção

$$\mathcal{O}_i \equiv \mathbf{Y}_f / \mathbf{Y}_p. \quad (3.9)$$

Essa é a projeção ortogonal do espaço linha da matriz \mathbf{Y}_f no espaço linha da matriz \mathbf{Y}_p . A decomposição RQ é a ferramenta numérica empregada para o cálculo dessa projeção ortogonal [22].

3. Calcular a decomposição em valores singulares da projeção ponderada, por meio de

$$\mathbf{W}_1 \mathcal{O}_i \mathbf{W}_2 = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T, \quad (3.10)$$

onde \mathbf{W}_1 e \mathbf{W}_2 são matrizes de peso que diferem de acordo com o método de subespaço de estados escolhido [36], \mathbf{U} e \mathbf{V} são matrizes ortogonais e \mathbf{S} é uma matriz diagonal contendo

os valores singulares da projeção ponderada. Para o N4SID as matrizes de peso são matrizes identidade. Para o método CCA, \mathbf{W}_1 é igual a $\Phi_{[Y_f, Y_f]}^{-1/2}$ (onde $\Phi_{[Y_f, Y_f]}$ é a matriz de covariância da matriz \mathbf{Y}_f) e \mathbf{W}_2 é uma matriz identidade.

4. Definir a ordem n do sistema como igual ao número de valores singulares significantes na matriz \mathbf{S} . Particionar a decomposição em valores singulares da seguinte maneira

$$\mathbf{W}_1 \mathcal{O}_i \mathbf{W}_2 = \mathbf{USV}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 & \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{S}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

onde $\mathbf{U}_1 \in \mathbb{R}^{il \times n}$, $\mathbf{U}_2 \in \mathbb{R}^{il \times (il-n)}$, $\mathbf{S}_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{S}_2 \in \mathbb{R}^{(il-n) \times (j-n)}$, $\mathbf{V}_1^T \in \mathbb{R}^{n \times j}$ e $\mathbf{V}_2^T \in \mathbb{R}^{(j-n) \times j}$.

5. Calcular a matriz de observabilidade estendida ($i > n$) Γ_i

$$\Gamma_i = \mathbf{W}_1^{-1} \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{1/2}. \quad (3.12)$$

A matriz de observabilidade estendida de um sistema representado em espaço de estados é dada pela Equação (3.13) [22].

$$\Gamma_i \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \dots \\ \mathbf{CA}^{i-1} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{li \times n}. \quad (3.13)$$

Essa formulação é utilizada no próximo passo para a obtenção das matrizes do sistema.

6. Obter as matrizes \mathbf{A} e \mathbf{C} a partir da matriz de observabilidade estendida.

A matriz \mathbf{A} é obtida por:

$$\mathbf{A} = \underline{\Gamma}_i^\dagger \bar{\Gamma}_i, \quad (3.14)$$

onde $\underline{\Gamma}_i$ e $\bar{\Gamma}_i$ são iguais a matriz de observabilidade esten-

didada $\mathbf{\Gamma}_i$, sem as últimas l linhas e sem as primeiras l linhas, respectivamente; e o sinal (\dagger) é utilizado para representar a pseudo-inversa de uma matriz.

A matriz \mathbf{C} é determinada pelas primeiras l linhas de $\mathbf{\Gamma}_i$.

O interesse está nos autovalores da matriz de estados \mathbf{A} , a partir dos quais são obtidos os modos de oscilação comuns aos sinais formados pelas séries de amostras $y_j(t)$. Os valores de frequência de oscilação e taxa de amortecimento dos modos de oscilação são obtidos através das equações (2.8) e (2.9), respectivamente.

Para análises multissinal, ou seja, com $l > 1$ para os vetores de saída y_k , calculam-se ainda as formas modais dos modos de oscilação relacionadas a cada saída. Para o problema de identificação considerado neste trabalho, sem a presença de entradas externas, isso é facilmente obtido por meio da Equação (3.15) [40]:

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{C}\phi_i, \quad (3.15)$$

onde:

ϕ_i é o autovetor a direita da matriz \mathbf{A} relacionado ao i -ésimo modo.

Essa é uma grande vantagem da formulação puramente estocástica, pois as formas modais permitem verificar as relações das saídas com os modos identificados.

Algumas ressalvas devem ser feitas na utilização do algoritmo apresentado e mais genericamente na aplicação de métodos de subespaço de estados. A primeira é com relação às dimensões das matrizes de bloco de Hankel estendidas. A abordagem considerada pelo trabalho pioneiro [41] e outros trabalhos seguintes, recai na aplicação de CCA a duas matrizes duplamente infinitas (ou seja, com número de linhas e colunas infinito). No entanto, após uma análise detalhada desse tipo de matrizes duplamente infinitas, consegue-se aplicar a técnica a problemas de matrizes semi-infinitas, ou seja, apenas o número de colunas

necessita ser muito grande, enquanto que o número de linhas de blocos pode permanecer suficientemente pequeno [22]. Por isso, para a obtenção de bons resultados com a aplicação de métodos de subespaço de estados deve-se ter longos conjuntos de medidas, o que resulta em um grande número de colunas das matrizes de bloco de Hankel.

Ressalta-se ainda que apesar de o algoritmo possibilitar a determinação da ordem do modelo no passo 4, uma prática comum empregada é arbitrar a ordem com um número considerado elevado (em geral, entre 20 e 25) [9]. Como em geral os sistemas elétricos são dominados por alguns poucos modos de oscilação, os outros modos fornecidos pelo algoritmo serão meros artifícios matemáticos e podem ser identificados e descartados por técnicas de determinação de dominância modal.

3.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Os métodos de estimação de modos baseados em medidas são uma interessante alternativa à tradicional abordagem de análise dependente da modelagem física dos SEE. Neste capítulo foram apresentados os conceitos gerais desses métodos, destacando a sua aplicação com a utilização de sincrofasores para a obtenção de resultados mais precisos. Basicamente, os métodos apresentados são classificados como paramétricos e não-paramétricos. Os métodos paramétricos assumem um modelo de representação do sistema em estudo, enquanto que os métodos não-paramétricos não fazem quaisquer hipóteses nesse sentido. Em geral, uma boa prática é realizar a verificação cruzada entre os resultados de métodos das duas classes.

No capítulo também foram apresentados os algoritmos das duas técnicas de estimação utilizadas neste trabalho: o método de Welch e o método de subespaço de estados CCA. Essas técnicas foram implementadas computacionalmente em um aplicativo desenvolvido para o monitoramento em tempo real de modos eletromecânicos em SEE. No Capítulo 4 a seguir apresenta-se o projeto desse aplicativo. Enquanto que, no Capítulo 5, descreve-se a implementação computacional do apli-

cativo a partir do que foi estabelecido na etapa de projeto.

4 PROJETO DO APLICATIVO COMPUTACIONAL

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o projeto de um aplicativo de monitoramento em tempo real de modos eletromecânicos com a utilização de sincrofasores. Os principais processos realizados pelo aplicativo são descritos, como: a aquisição e a interpretação de um fluxo de grandezas fasoriais enviado por um PDC; o monitoramento das grandezas fasoriais adquiridas por meio de gráficos polares e no tempo; e a aplicação de técnicas de identificação de modos eletromecânicos nos sinais traçados em gráficos no tempo. Os detalhes acerca dos requisitos de cada uma dessas etapas são fornecidos a seguir.

4.2 ARQUITETURA DO APLICATIVO DESENVOLVIDO

A arquitetura do aplicativo de monitoramento é apresentada nesta seção de acordo com os processos executados. O primeiro processo realizado pelo aplicativo é a aquisição de dados fasoriais, recebidos por meio de um fluxo de dados enviado por um PDC. Após a aquisição, os *frames* de dados são interpretados e organizados para utilizações posteriores. Assim, a partir dos dados processados pode-se monitorar as grandezas fasoriais através de gráficos polares e no tempo. Por fim, nos sinais traçados no tempo, aplicam-se técnicas de identificação (apresentadas no Capítulo 3) para o monitoramento de modos eletromecânicos. A Figura 6 apresenta um diagrama ilustrativo do funcionamento global do aplicativo projetado, considerando os processos descritos anteriormente.

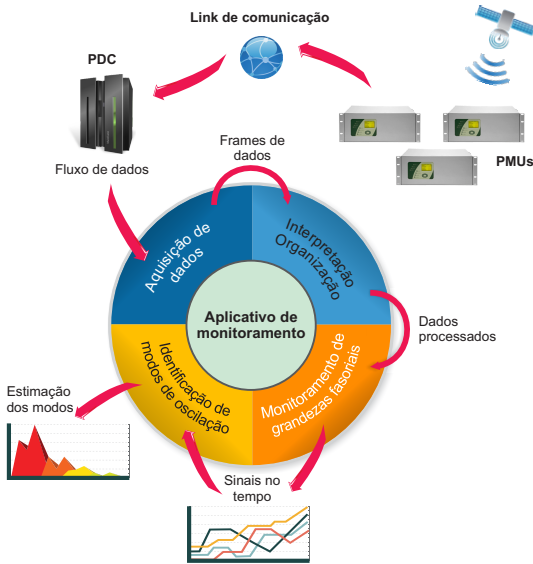


Figura 6 – Diagrama ilustrativo do aplicativo de monitoramento.

4.2.1 Aquisição

A aquisição de um fluxo de dados fasoriais em tempo real é o primeiro processo realizado pelo aplicativo de monitoramento. Conforme mencionado na seção 1.1, o PDC é o responsável pela disponibilização das medidas fasoriais para aplicações *off-line* e em tempo real.

Em geral, utiliza-se UDP (*User Datagram Protocol*) em transmissões de dados para aplicações em tempo real. Isto porque, o UDP é um protocolo de comunicação que não se atém a tratamento de erros e à espera de pacotes de dados perdidos, o que pode comprometer a rapidez na transmissão dos dados. Ao contrário do TCP (*Transmission Control Protocol*) que garante a entrega dos pacotes enviados às custas de possíveis esperas, inviáveis em aplicações em tempo real.

O UDP funciona sem a necessidade de realizar conexão entre servidor e cliente. Um PDC pode ser configurado para o envio de um fluxo de dados a um ou mais clientes via UDP. Fluxos UDP Unicast são

direcionados exclusivamente a um cliente, fluxos UDP Multicast ficam disponíveis a todos os clientes de uma rede, que os recebem de acordo com suas necessidades. A Figura 7 ilustra esses dois tipos de fluxos UDP sendo enviados por um PDC em uma rede local.

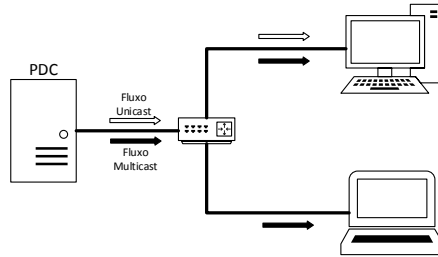


Figura 7 – Tipos de comunicação via UDP.

Caso o fluxo seja direcionado a um cliente específico (UDP Unicast), o aplicativo de monitoramento necessita apenas da informação da porta na qual os dados chegam na estação de trabalho. Se o fluxo for transmitido a um grupo de clientes na rede (UDP Multicast) é necessário o número de IP (*Internet Protocol*) do grupo e novamente da porta na qual os dados chegam. Essas informações devem, de alguma forma, estar pré-configuradas ou disponíveis para que o aplicativo de monitoramento possa receber o fluxo de dados fásoriais. Neste projeto considera-se o armazenamento local dessas configurações em um arquivo de texto.

4.2.2 Interpretação

O processo seguinte ao recebimento dos dados é o de interpretação dos pacotes (*frames*) que compõem o fluxo enviado pelo PDC. Esses *frames* são padronizados de acordo com a norma IEEE C37.118-2 2011 [42], que estabelece a transmissão de dados de/para equipamentos de SPMS. Quatro tipos de *frames* são definidos na norma: comando, cabeçalho, configuração e dados. A estrutura comum aos quatro tipos

de *frames* é apresentada na Figura 8.

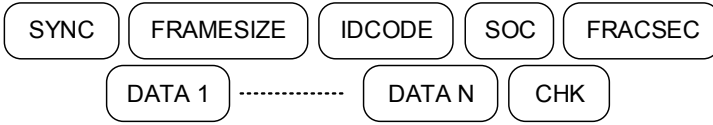


Figura 8 – Estrutura comum dos *frames*.

Os campos “DATA” variam de acordo com o tipo de *frame*. A quantidade de *bytes* e a descrição sucinta dos campos comuns a todos os *frames* são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Campos comuns a todos os *frames*.

| Campo | Tamanho (<i>bytes</i>) | Descrição |
|-----------|--------------------------|---|
| SYNC | 2 | Sincronização e informações acerca do tipo e versão do <i>frame</i> . |
| FRAMESIZE | 2 | Nº total de <i>bytes</i> no <i>frame</i> . |
| IDCODE | 2 | Identificação de equipamento remetente para <i>frames</i> de cabeçalho, configuração e dados ou de equipamento destinatário para <i>frames</i> de comando. |
| SOC | 4 | Etiqueta de tempo em SOC. |
| FRACSEC | 4 | Fração de segundo (na qual foi feita a medição para <i>frames</i> de dados ou na qual foi feito o envio para os outros tipos de <i>frames</i>) e qualidade de tempo. |
| CHK | 2 | Indicação da integridade dos <i>bytes</i> do <i>frame</i> . |

A etiqueta de tempo exata de um *frame* é formada pelos campos SOC¹ e FRACSEC através da seguinte equação:

$$\text{Time} = \text{SOC} + \frac{\text{FRACSEC}}{\text{TIME_BASE}}, \quad (4.1)$$

onde TIME.BASE é um campo contido no *frame* de configuração com a resolução da fração de segundo da etiqueta de tempo.

Em geral, os fluxos de dados enviados por PDCs para aplicações são compostos apenas de *frames* de configuração, enviados a certos

¹Valores em SOC (*Second Of Century*) são utilizados para representar instantes de tempo na base de tempo UNIX. Os valores correspondem ao total de segundos entre o instante representado e a meia-noite (no horário UTC -*Universal Time Coordinated*) de 1º de janeiro de 1970 [42].

intervalos de tempo, e *frames* de dados, que contém de fato os sincrofases e medidas analógicas e digitais monitoradas pelas PMUs. Os *frames* de configuração funcionam como uma espécie de mapa para a leitura dos *frames* de dados. As definições de campos exclusivas aos *frames* de configuração são especificadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Estrutura dos *frames* de configuração.

| Campo | Tamanho (<i>bytes</i>) | Descrição |
|-----------|--|---|
| SYNC | 2 | Sincronização e tipo e versão do <i>frame</i> de configuração. |
| TIME_BASE | 4 | Resolução da fração de segundo da etiqueta de tempo. |
| NUM_PMU | 2 | Nº de PMUs incluídas nos <i>frames</i> de dados do fluxo. |
| STN | 16 | Nome da estação (em formato ASCII). |
| IDCODE | 2 | Identificação do equipamento fonte de cada bloco de medidas nos <i>frames</i> de dados. |
| FORMAT | 2 | Formato dos dados dentro dos <i>frames</i> de dados. |
| PHNMR | 2 | Nº de medidas fasoriais. |
| ANNMR | 2 | Nº de medidas analógicas. |
| DGNMR | 2 | Nº de palavras digitais de <i>status</i> . |
| CHNAM | $16 \times (\text{PHNMR} + \text{ANNMR} + 16 \times \text{DGNMR})$ | Nome dos canais de medidas fasoriais, analógicas e digitais. |
| PHUNIT | $4 \times \text{PHNMR}$ | Fator de conversão para canais de medidas fasoriais. |
| ANUNIT | $4 \times \text{ANNMR}$ | Fator de conversão para canais de medidas analógicas. |
| DIGUNIT | $4 \times \text{DGNMR}$ | Máscara de conversão para canais de palavras digitais. |
| FNOM | 2 | Frequência nominal da rede. |

Com as informações do *frame* de configuração é possível configurar o processo de leitura dos *frames* de dados adequadamente. Pode-se organizar os dados por equipamento, de acordo com o número de canais de grandezas (fasoriais, analógicas e digitais) associados. Além disso, têm-se os valores de fatores de conversão para as medidas, entre outros parâmetros relevantes.

As definições de campos exclusivas aos *frames* de dados são mos-

tradas na Tabela 3. De acordo com o campo NUM_PMU do *frame* de

Tabela 3 – Estrutura dos *frames* de dados.

| Campo | Tamanho (<i>bytes</i>) | Descrição |
|---------|--|---|
| SYNC | 2 | Sincronização e versão do <i>frame</i> de dados. |
| STAT | 2 | Conjunto de <i>flags</i> que definem o <i>status</i> das medidas. |
| PHASORS | $4 \times \text{PHNMR}$ ou $8 \times \text{PHNMR}$ | Medidas fasoriais. |
| FREQ | 2/4 | Frequência da rede. |
| DFREQ | 2/4 | Taxa de variação da frequência da rede. |
| ANALOG | $2 \times \text{ANNMR}$ ou $4 \times \text{ANNMR}$ | Medidas analógicas. |
| DIGITAL | $2 \times \text{DGNMR}$ | Palavras digitais de <i>status</i> . |

configuração, repetem-se os blocos de campos de STAT a DIGITAL para cada PMU. Com o mapeamento fornecido pelo *frame* de configuração as medidas podem ser corretamente interpretadas e disponibilizadas para o processo de organização do aplicativo de monitoramento.

4.2.3 Organização

Os *frames* de dados são organizados em blocos referentes às PMUs que compõem o SPMS. Essa estruturação é algo natural mas pouco prático para utilização em aplicativos de monitoramento como o desenvolvido neste trabalho. Isto porque uma mesma PMU, quando instalada em uma subestação da rede de transmissão, por exemplo, pode monitorar mais de uma Linha de Transmissão (LT). Assim, organizar as medidas por LT (ou em um termo mais amplo por “terminal de medição”) apresenta-se como uma alternativa mais conveniente. Um exemplo é mostrado na Figura 9, onde uma PMU monitora duas LTs diferentes na “Barra A” de uma subestação.

A organização por LT permite a geração de gráficos a partir das grandezas de uma única LT. Para a utilização desse tipo de organização, no entanto, necessita-se de informações pré-configuradas da formação

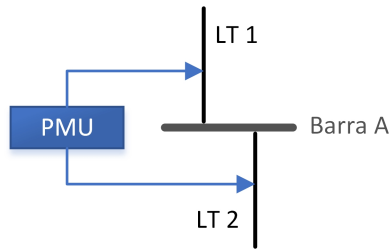


Figura 9 – PMU medindo grandezas de mais de uma LT em uma subestação.

de cada “terminal de medição”. Isso é feito no aplicativo de monitoramento por meio de um arquivo de configuração contendo o nome de cada terminal e as medidas fasoriais relacionadas. Um exemplo de arquivo de configuração relativo à Figura 9 é mostrado na Figura 10.

```

Fluxo_PDC 60 2
Terminal de medição {
  001 LT_1 6 230.000 1.000
  0 TENSAO A
  1 TENSAO B
  2 TENSAO C
  3 CORRENTE A
  4 CORRENTE B
  5 CORRENTE C
Terminal de medição {
  001 LT_2 3 230.000 1.000
  6 CORRENTE A
  7 CORRENTE B
  8 CORRENTE C

```

Figura 10 – Exemplo de arquivo de configuração de fluxo de dados.

Na primeira linha do arquivo encontra-se um nome de identificação do fluxo de dados, a taxa de amostragem das medições enviadas no fluxo (no caso mostrado, 60 fasores por segundo) e o número de terminais de medição configurados no arquivo. Após essa linha inicial estão os blocos referentes a cada terminal de medição.

A primeira linha do bloco é composta: pelo IDCODE da PMU

que monitora o terminal (campo 9 do *frame* de configuração); pelo nome do terminal; o número de canais de medidas fasoriais; a tensão base da LT (terminal de medição); e a corrente base da LT (terminal de medição). As linhas seguintes trazem as informações de cada um dos canais fasoriais associados ao terminal de medição. O primeiro campo é a posição do canal no bloco de medidas fasoriais da PMU no *frame* de dados (campo 7 do *frame* de dados). O segundo campo indica o tipo de grandeza monitorada por este canal (tensão ou corrente) e o terceiro campo especifica a fase monitorada (A, B, C ou sequência positiva).

A partir dessas informações pode-se compor um leque de possibilidades para o monitoramento de grandezas fasoriais, facilitando as escolhas dos usuários do aplicativo. Isto porque, a partir dessas informações pode-se oferecer, por exemplo, a opção de gráficos de tensões/correntes trifásicas diretamente, sem a necessidade do usuário escolher uma por vez as medidas referentes as três fases de um terminal de medição. Pode-se ainda realizar cálculos de tensões/correntes de sequência positiva a partir das informações da sequência de fases monitoradas.

4.2.4 Monitoramento de grandezas fasoriais

O monitoramento de grandezas fasoriais é orientado por “terminal de medição”, o que confere grande praticidade à interação do usuário com o aplicativo. Com o agrupamento das medidas por terminais e a identificação das grandezas e fases de cada terminal, proporcionados pelo arquivo de configuração do aplicativo, pode-se compor uma interface de escolha de gráficos temporais conforme as possibilidades da Figura 11.

Para traçar gráficos de ângulo de tensões ou correntes é necessário selecionar um terminal como referência. Para ambos os casos, o ângulo de referência utilizado é do fasor de tensão da respectiva fase ou sequência. Os gráficos de potências ativas e reativas estão disponíveis apenas para terminais com medições trifásicas de tensões e correntes.

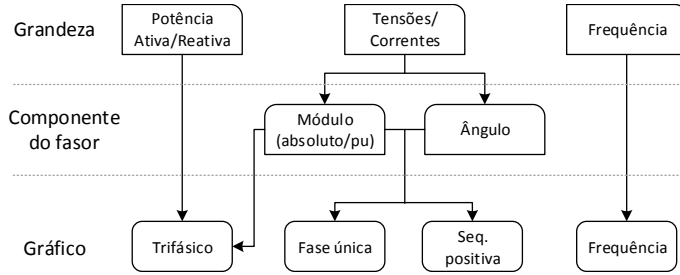


Figura 11 – Opções de gráficos no aplicativo desenvolvido.

As potências ativas e reativas trifásicas são calculadas por meio das seguintes equações [43], respectivamente:

$$P = |V_A| |I_A| \cos \varphi_A + |V_B| |I_B| \cos \varphi_B + |V_C| |I_C| \cos \varphi_C, \quad (4.2a)$$

$$Q = |V_A| |I_A| \sin \varphi_A + |V_B| |I_B| \sin \varphi_B + |V_C| |I_C| \sin \varphi_C, \quad (4.2b)$$

onde $\varphi_A = \angle V_a - \angle I_a$ (de maneira semelhante para as demais fases).

Além dessas opções de gráficos temporais, projetou-se a implementação de gráficos polares, com os quais pode-se visualizar diferenças angulares de tensões ou correntes em relação à tensão de um terminal definido como referência angular.

4.2.5 Identificação de modos de oscilação

A identificação de modos de oscilação é feita utilizando os sinais temporais traçados na etapa de monitoramento de grandezas fasoriais. Para isso, o método de subespaço de estados CCA e o método de Welch são aplicados aos sinais e seus resultados são analisados por meio de uma verificação cruzada. Todavia, antes da aplicação dos métodos, realiza-se o pré-processamento dos sinais para a obtenção de resultados mais confiáveis e precisos.

4.2.5.1 Pré-processamento dos sinais temporais

O pré-processamento dos sinais utilizados para a identificação de modos de oscilações eletromecânicas é composto pelos blocos apresentados na Figura 12.

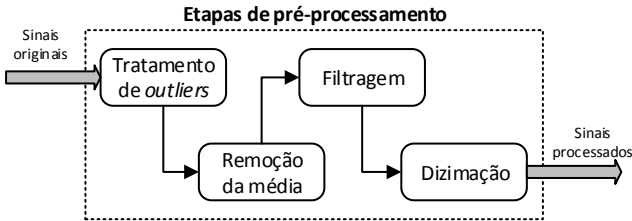


Figura 12 – Blocos de pré-processamento.

4.2.5.1.1 Tratamento de outliers

Um *outlier* é um valor amostrado sujeito a um erro de medição e que por isso varia significativamente do restante das amostras de sua vizinhança [44]. Um exemplo é mostrado na Figura 13.

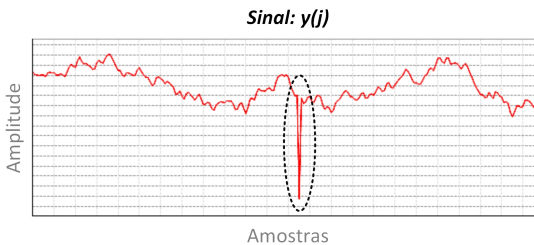


Figura 13 – Exemplo de *outlier* em um sinal.

Os *outliers* resultam em impactos indesejados em processos de filtragem, induzindo transitórios artificiais nos sinais filtrados [44]. Para evitar esse tipo de resultado, os *outliers* devem ser removidos do sinal antes da aplicação de qualquer processo de filtragem. Basicamente, isso

é feito por um algoritmo que verifica se o valor da amostra encontra-se em uma certa faixa de valores, conforme:

$$|MM_j| - \alpha\sigma < |y_j| < |MM_j| + \alpha\sigma \quad (4.3)$$

onde MM_j é a média móvel do sinal na amostra j (neste trabalho calculada por um filtro de média móvel de ordem 20), α é um número inteiro, σ é o desvio-padrão do sinal e y_j é a amostra em análise. O valor de α em geral é ajustado entre 3 e 5. Ou seja, ao escolher $\alpha = 3$ admite-se que o valor da amostra y_j desvie no máximo três desvios-padrão da j -ésima média móvel.

Após a detecção de um *outlier* deve-se removê-lo e preencher o espaço deixado pela medida removida. Em geral, utilizam-se técnicas de interpolação para este fim. Neste projeto, considera-se a utilização de interpolação linear.

4.2.5.1.2 Remoção da média

Como o método de subespaço de estados CCA aplicado neste trabalho considera a identificação de sistemas puramente estocásticos, componentes determinísticas nos sinais utilizados na identificação deterioraram os resultados. Por isso, a remoção da média do sinal é uma importante etapa no pré-processamento. Além disso, a remoção da média aumenta a relação sinal ruído (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*), contribuindo para a efetividade da estimação dos modos de oscilação [40].

4.2.5.1.3 Filtragem

Como a faixa de frequências de interesse dos modos de oscilações eletromecânicas encontra-se majoritariamente entre 0,1 a 2 Hz, as componentes do sinal com frequências fora dessa faixa podem ser removidas. Com isso, pode-se eliminar em grande parte ruídos do sinal, bem como componentes de dinâmica muito lenta, associadas a ação de con-

troladores. Um exemplo é o Controle Automático de Geração (CAG), responsável pelo balanço carga-geração para a manutenção do nível de frequência em SEE [45].

A remoção de ruídos aumenta a SNR enquanto que a remoção dos modos de controle, de frequências muito baixas, evita grandes diferenças de escala ao empregar a DFT, devido às relativamente altas amplitudes desses modos [44]. Um exemplo disso é apresentado na Figura 14, onde a grande amplitude verificada em uma frequência muito baixa, “minimiza” a presença de outros modos de oscilação, como o modo em torno de 0,5 Hz.

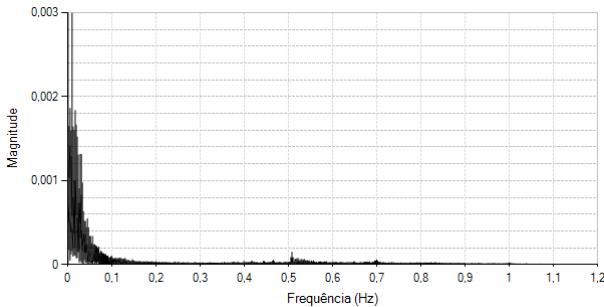


Figura 14 – Espectro de frequências com predominância de modos de baixas frequências.

Para realizar a filtragem neste trabalho foi escolhido um filtro do tipo FIR (*Finite Impulse Response*). Tais filtros utilizam apenas a amostra atual e amostras passadas de entrada, desprezando as amostras passadas de saída do filtro, para a obtenção do valor da amostra de saída atual. Por isso, comumente refere-se a esses filtros como não-recursivos [46].

A Equação (4.4) fornece a n -ésima amostra de saída de um filtro FIR de ordem M .

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k)x(n-k) \quad (4.4)$$

onde $h(k)$ é o k -ésimo coeficiente do filtro e $x(n)$ é a n -ésima amostra

do sinal de entrada. Essa é a equação de convolução entre dois sinais no domínio do tempo, aplicada a filtros FIR digitais. Na Figura 15 pode-se ver a representação gráfica da Equação (4.4).

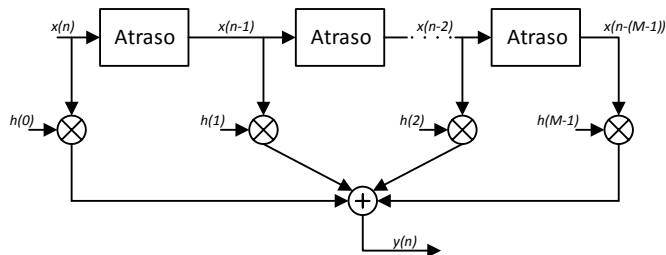


Figura 15 – Representação de um filtro FIR de ordem M .

Uma importante propriedade da operação de convolução no tempo é:

$$h(k) * x(k) \iff H(m)X(m), \quad (4.5)$$

onde o símbolo “*” significa convolução e a seta dupla identifica um par de transformada de Fourier. A Equação (4.5) mostra que a convolução no domínio do tempo é equivalente a multiplicação no domínio da frequência [47].

Essa propriedade possibilita o emprego de algoritmos de FFT para cálculos de convolução de maneira mais eficiente do que utilizando a Equação (4.4). Esse processo, chamado de convolução rápida, é ilustrado na Figura 16.

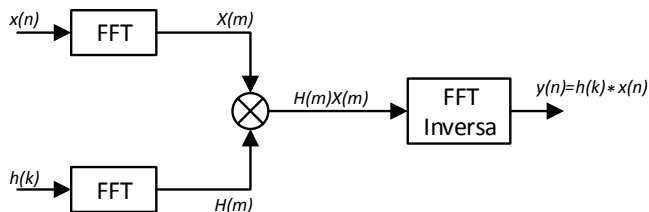


Figura 16 – Filtragem FIR com a utilização de FFT.

Esse processo apresenta a grande vantagem de, quando os coefi-

cientes do filtro são constantes, o espectro $H(m)$ precisa ser calculado apenas uma vez. Com isso, o espectro dos coeficientes do filtro pode ser calculado no início do processo e armazenado em memória.

Neste trabalho, para o cálculo dos coeficientes do filtro foi utilizada a janela de Hanning (também conhecida por janela de Hann), cujos coeficientes são calculados por [46]:

$$w(n) = 0,5 - 0,5\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad \text{para} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (4.6)$$

A janela de Hanning tem a forma apresentada na Figura 17.

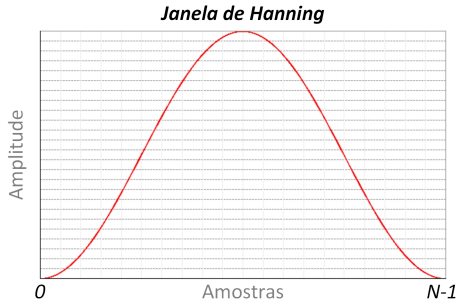


Figura 17 – formato da janela Hanning.

Técnicas de “janelamento” reduzem o vazamento espectral na aplicação da DFT. Isto é feito suavizando a amplitude do sinal no início e no fim do segmento [46], como pode ser visto na forma da janela de Hanning.

Todas as técnicas apresentadas nesta seção foram utilizadas para o projeto de um filtro passa-banda do tipo FIR com frequências de corte de 0,1 e 2,0 Hz e ordem igual a 500 (a ordem dos filtros utilizados nesse tipo de processo ainda é uma discussão em aberto [9]).

4.2.5.1.4 Dizimação

O processo de dizimação (*downsampling*) é o último do pré-processamento dos sinais. A razão para realizar a dizimação é que

a precisão na estimação dos modos não aumenta com altas taxas de amostragem. Taxas de amostragem muito altas ocasionam problemas numéricos e alta sensibilidade na conversão de polos discretos para polos contínuos [36]. A escolha da taxa de amostragem deve levar em conta a faixa de frequências de interesse na análise (0,1 a 2 Hz para oscilações eletromecânicas). Considerando o Teorema de Nyquist-Shannon essa taxa deve ser de pelo menos 4 Hz [40]. Praticamente, para fornecer uma margem segura escolhe-se a reamostragem à frequência de 5 Hz.

Além da melhoria nos resultados numéricos, a dizimação resulta em ganhos no desempenho computacional. A justificativa é que há uma grande redução no número de dados em uma janela de análise. Por exemplo, considerando a utilização de uma janela de 5 minutos de dados com resolução de 60 Hz, tem-se um total de 18.000 amostras. Adotando nova resolução de 5 Hz, o número total de amostras na janela é reduzido a 1.500.

4.2.5.2 Aplicação das metodologias de identificação

Após o pré-processamento os sinais estão prontos para a aplicação dos métodos de identificação. O método paramétrico CCA e o método não-paramétrico de Welch são utilizados na estimação dos modos de oscilações eletromecânicas que compõem os sinais. Os resultados obtidos pelo métodos são submetidos a uma verificação cruzada entre si. A análise pode ser realizada para um ou mais sinais. Quanto mais sinais utilizados maior é o tempo computacional para a execução dos algoritmos de identificação. Isso é observado em especial para o método de subespaço CCA, já que as matrizes (3.8a) e (3.8b) têm número de linhas igual a li , sendo l o número de sinais.

O tamanho das janelas de análise também influencia no tempo de execução dos algoritmos. Ambos os métodos trabalham com processamento por bloco, ou seja, cada vez que novas medidas são recebidas, a janela de dados inteira é processada para a realização da estimação.

Os detalhes particulares da implementação dos dois métodos de

identificação são expostos a seguir. Na sequência, uma seção trata do processo de verificação cruzada entre os resultados obtidos pelos métodos.

4.2.5.2.1 Método de Welch

Basicamente, para a aplicação do método de Welch (seção 3.3.1.1) deve-se definir os parâmetros de segmentação dos sinais em análise e a janela utilizada para o cálculo das transformadas de Fourier do processo. Os parâmetros de segmentação são: o comprimento dos segmentos e a sobreposição entre segmentos adjacentes (ver Figura 4). O comprimento dos segmentos implica diretamente na resolução do eixo de frequências do periodograma (Equação (3.4)). Por exemplo, ao dividir o sinal em segmentos de 10 amostras cada, tem-se $\Delta f = 0,1\text{Hz}$. Ou seja, a escolha dos comprimentos dos segmentos deve concordar com a necessidade de precisão da análise. Para a aplicação de identificação de modos de oscilações eletromecânicas considerada neste trabalho, admitem-se resoluções mínimas de 0,01 Hz. Com isso, os segmentos devem ser formados por ao menos 100 amostras.

A sobreposição entre segmentos adjacentes suaviza diferenças entre os resultados de sucessivos espectros, diminuindo a variância das estimativas [23]. Neste trabalho foi adotada como padrão a sobreposição igual à metade dos segmentos, ou seja, $D = L/2$ (ver Figura 4).

Para calcular as transformadas de Fourier dos segmentos (Equação (3.2)), novamente foi escolhida a janela de Hanning. Por fim, os valores de amplitudes obtidos para cada frequência dos periodogramas são calculados em decibéis para melhor representação gráfica.

4.2.5.2.2 Método de CCA

Para a aplicação do método de CCA deve-se definir a ordem n do modelo empregado e o número de linhas de blocos (li) das matrizes estendidas de Hankel (Equações (3.8a) e (3.8b)). Embora os sistemas

elétricos sejam de alta ordem, qualquer sinal medido é tipicamente dominado por alguns poucos modos. Para a obtenção de um melhor condicionamento numérico, no entanto, geralmente adota-se uma ordem entre 20 a 25 para o modelo estimado, o que resulta na estimação de vários modos [9, 44]. O problema então se torna determinar qual modo é o modo eletromecânico dominante e quais são artifícios numéricos ou modos eletromecânicos menos excitados.

Existem várias técnicas para a separação dos modos físicos reais dos modos “matemáticos”, sem significado físico. Em geral, os modos reais apresentam energias superiores aos modos espúrios, com isso a ordenação dos modos de acordo com os valores de energia associados é uma técnica simples e efetiva.

Na realidade, como os sinais são aleatórios, não se pode calcular a energia de um modo no domínio do tempo. No entanto, pode-se calcular a “pseudo-energia” do modo i como [48]:

$$E_i = \sum_{m=1}^M \left\{ R_{mi}^* R_{mi} \sum_{q=0}^{N-1} [(z_i^q)^* (z_i^q)] \right\}, \quad (4.7)$$

onde:

m é o número de sinais empregados na análise;

N é o número de amostras dos sinais;

R_{mi} é o resíduo associado ao modo i e ao sinal m ;

z_j é o autovalor discreto que representa o modo j .

Outra maneira de caracterizar os modos dominantes dos sinais é por meio do cálculo do Índice de Dominância Modal (IDM) [49]. O IDM de um autovalor no domínio contínuo λ_i , considerando uma análise mono-sinal, pode ser calculado por:

$$\gamma_i \equiv \frac{-[R_i \lambda_i^* + R_i^* \lambda_i]}{2\lambda_i \lambda_i^*} \equiv \frac{-Re \{R_i \lambda_i^*\}}{\lambda_i \lambda_i^*}. \quad (4.8)$$

O IDM leva em conta tanto informações sobre os períodos de dados de grandes perturbações quanto de períodos de dados de ambiente

de um sinal. Dessa forma, o IDM pode indicar os modos dominantes mesmo quando esses não são os mais lentos.

Uma última consideração a ser feita diz respeito a aplicação de algumas regras antes dos cálculos das métricas de ordenação dos modos. Modos representados por frequências negativas não são considerados na seleção. Além disso, modos com estimativas de taxas de amortecimento maiores que 30% também são descartados. Primeiramente, porque não apresentam riscos aos SEE devido ao elevado amortecimento e, em segundo lugar, pela dificuldade na estimação de modos bem-amortecidos, que pode levar a resultados pouco precisos [9].

4.2.5.3 Verificação cruzada

Após a aplicação dos métodos de identificação realiza-se uma verificação cruzada entre os resultados obtidos. Esse processo serve sobretudo para identificar falhas na estimação, ou na seleção do modo dominante, realizadas pelo método de subespaço de estados CCA. Com isso, busca-se uma redução expressiva na dispersão dos valores de frequências e taxas de amortecimento para os períodos analisados.

Basicamente, o processo de verificação é realizado por meio da relação apresentada a seguir:

$$[\mathbf{f}_{\text{welch}}(a_{\text{máx}}) - \Delta f_{\text{welch}}] < \mathbf{f}_{\text{cca}}(b_{\text{máx}}) < [\mathbf{f}_{\text{welch}}(a_{\text{máx}}) + \Delta f_{\text{welch}}], \quad (4.9)$$

onde:

$\mathbf{f}_{\text{welch}}$ é o vetor de frequências estimadas no método de Welch;

\mathbf{f}_{cca} é o vetor de frequências estimadas pelo método de subespaço de estados CCA;

Δf_{welch} é a resolução do eixo de frequências do periodograma estimado;

$a_{\text{máx}}$ é o índice da frequência do modo dominante, de acordo com as amplitudes das frequências estimadas no método de

Welch;

$b_{m\acute{a}x}$ é o índice da frequência do modo dominante, de acordo com uma das métricas de ordenação dos modos aplicadas aos resultados do método CCA.

A Figura 18 representa graficamente esse processo de comparação. Se a frequência do modo dominante estimado pelo método CCA obedecer a Equação (4.9), o resultado da estimação é considerado válido. Assim, o valor estimado de frequência e a respectiva taxa de amortecimento do modo devem ser apresentados de maneira gráfica no aplicativo de monitoramento.

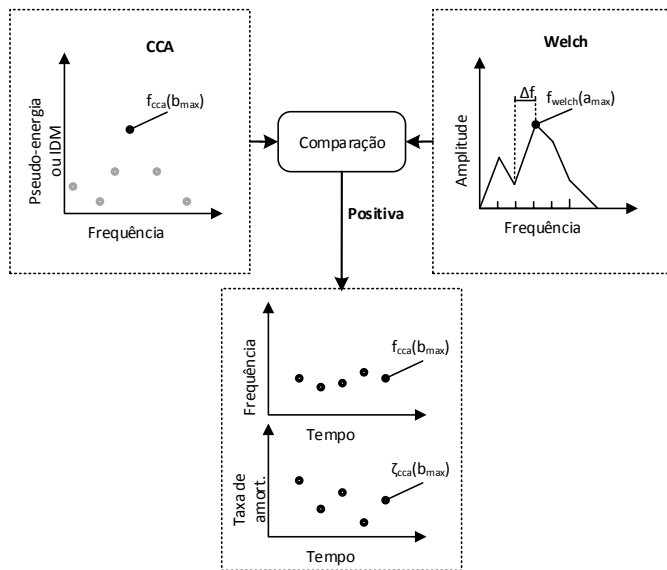


Figura 18 – Verificação cruzada entre resultados dos métodos de identificação.

4.3 COMENTÁRIOS FINAIS

O projeto do aplicativo de monitoramento em tempo real de modos eletromecânicos em SEE, desenvolvido neste trabalho foi apre-

sentado neste capítulo. Os processos realizados pelo aplicativo foram basicamente agrupados em cinco blocos: aquisição, interpretação, organização, monitoramento de grandezas fasoriais e identificação de modos de oscilação. De acordo com esse agrupamento, os principais requisitos de cada bloco foram descritos. Além disso, as ferramentas e técnicas utilizadas para o cumprimento de tais requisitos foram apresentadas. No próximo capítulo, apresenta-se a implementação computacional do projeto descrito.

5 MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

5.1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo descreve-se a implementação computacional do projeto de aplicativo de monitoramento proposto no Capítulo 4 deste trabalho. O aplicativo foi implementado utilizando conceitos de Modelagem Orientada a Objetos (MOO) e a linguagem computacional C#.

A seguir são expostos os conceitos básicos do paradigma da MOO e dos padrões de projeto empregados. Na sequência, descreve-se a plataforma computacional utilizada para a implementação. Após isso, apresentam-se os detalhes da implementação computacional do aplicativo.

5.2 PARADIGMA DA MODELAGEM ORIENTADA A OBJETOS

A MOO serve para projetar aplicativos de maneira clara e organizada. Em projetos de *software* faz com que a concentração dos esforços esteja nas primeiras etapas de desenvolvimento. Como o projeto fica bem estruturado e adaptável, modificações futuras são executadas com maior facilidade.

No âmbito desta metodologia os objetos computacionais servem para representar objetos do mundo real que fazem parte do problema. Cada objeto possui suas características (atributos) e funcionalidades (métodos).

As classes criadas em um projeto de *software* servem justamente para moldar um determinado tipo de objeto. Ou seja, a partir de uma classe definida pode-se gerar inúmeros objetos. Os objetos são chamados de “instâncias” das classes [50].

A MOO baseia-se em três pilares principais:

- Encapsulamento: consiste na separação de informações exter-

nas e internas dos objetos, a fim de preservar a integridade de dados internos que não devem ser alterados.

- Herança: permite que uma subclasse herde características de uma outra classe (superclasse).
- Polimorfismo: permite sobrecarregar certas operações e métodos, de forma que realizem diferentes procedimentos de acordo com o objeto que as utiliza.

5.2.1 Padrões de projeto

Os padrões de projeto (*design patterns*) são comumente aplicados em *softwares* orientados a objetos. Esses padrões resolvem problemas específicos de projetos proporcionando flexibilidade e reutilização. Dessa forma, o conhecimento de padrões de projeto permite ao projetista aplicá-los direta e rapidamente sem a necessidade de redescobri-los [51].

Segundo [51] os padrões de projeto podem ser classificados de acordo com dois critérios: finalidade e escopo. Quanto à finalidade os padrões podem ser de criação, estruturais ou comportamentais. Os padrões de criação relacionam-se com o processo de criação de objetos. Os padrões estruturais cuidam da composição de classes ou de objetos. Por fim, os padrões comportamentais caracterizam as formas de interação entre classes ou objetos distribuindo as respectivas responsabilidades.

O critério de escopo especifica se o padrão é aplicado à classes ou objetos. Os padrões para classes lidam com o relacionamento entre classes e suas sub-classes, ditado pelo mecanismo de herança. Esse tipo de relacionamento é estático, ou seja, modificado apenas em tempo de compilação. Os padrões para objetos lidam com relacionamentos entre objetos, que podem ser alterados em tempo de execução.

Dois padrões de projeto foram utilizados no aplicativo desenvolvido neste trabalho. Um padrão de criação para objetos, denomi-

nado “Singleton”, e um padrão comportamental para objetos chamado “Strategy”. A conceituação básica desses dois padrões de projeto é apresentada a seguir.

5.2.1.1 Padrão Singleton

O padrão Singleton tem como finalidade garantir que uma classe tenha uma única instância e fornecer um ponto global de acesso para a mesma. Isso é feito tornando a própria classe responsável pelo controle de sua única instância. Assim, essa classe pode garantir que nenhuma outra instância seja criada e permitir o acesso a sua única instância.

A estrutura básica do padrão Singleton é mostrada na Figura 19.

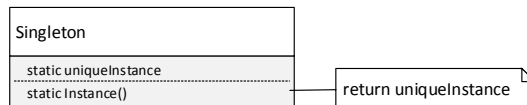


Figura 19 – Padrão Singleton.

O padrão é composto de um atributo (*uniqueInstance*) e um método (*Instance*), ambos estáticos. O método estático é responsável por retornar o atributo estático que contém a única instância da classe. Na realidade a instância é retornada caso já tenha sido criada, caso contrário o método deve criá-la.

5.2.1.2 Padrão Strategy

O padrão comportamental Strategy tem por objetivo definir uma família de algoritmos, encapsulá-los e torná-los intercambiáveis. A estrutura do padrão Strategy é apresentada na Figura 20.

A classe *Context* é a responsável pela execução de uma certa tarefa, por exemplo a estimação de modos de oscilações eletromecânicas em SEE. A classe *Context* não implementa nenhum algoritmo de es-

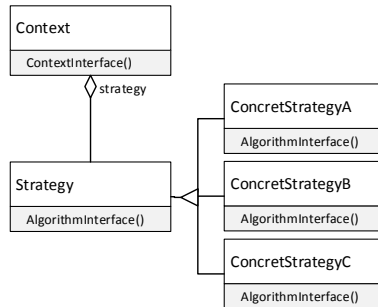


Figura 20 – Padrão Strategy.

timação de modos de oscilações eletromecânicas. Ao invés disso, os algoritmos são encapsulados nas subclasses da classe abstrata *Strategy*.

A utilização do padrão *Strategy* elimina a necessidade do cliente que interage com a classe *Context* de conhecer toda a estrutura de tratamento dos algoritmos na solução de uma tarefa. A organização dos algoritmos em classes *Strategy* torna a manutenção e atualização dos códigos centralizada. Além disso, a adição de novas estratégias de solução fica facilitada.

5.3 PLATAFORMA DE DESENVOLVIMENTO

O aplicativo foi desenvolvido em linguagem computacional C# com a utilização do ambiente Microsoft Visual Studio. A linguagem C# pertence a família de linguagens C (C, *Objective C*, C++, Java) [52] e faz parte da plataforma de desenvolvimento de aplicações *.NET*.

O compilador Microsoft Visual Studio é um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (*Integrated Development Environment*) especialmente dedicado à plataforma *.NET*. Nele podem ser criados projetos fazendo uso de linguagens como: C#, C++, Visual Basic, etc. Com a linguagem definida escolhe-se o tipo do projeto de acordo com a necessidade da aplicação. Entre as possibilidades estão: *Console Application* (aplicação de linha de comando), *Windows Forms Application* (inter-

face através de forms padrão Windows), *ASP.NET Web Application* (aplicação com interface Web). O aplicativo computacional desenvolvido neste trabalho é do tipo *Windows Forms Application*. Essa escolha permite a utilização de ferramentas gráficas como *forms* (janela típica de um programa padrão Windows) e objetos como *buttons* (botões utilizados para a execução de ações do aplicativo), facilitando a construção de interfaces amigáveis aos usuários.

5.4 ARQUITETURA COMPUTACIONAL DO APLICATIVO

O projeto de aplicativo de monitoramento discutido no Capítulo 4 tem seus detalhes computacionais descritos nesta seção. Para isso, novamente, o aplicativo é dividido de acordo com os seus principais blocos de funções: aquisição, interpretação, organização, monitoramento de grandezas fasoriais e identificação de modos de oscilação.

As classes implementadas para a abstração de estruturas do aplicativo são apresentadas durante a descrição das subseções seguintes de cada bloco. Como ferramentas suplementares para a compreensão estrutural e dinâmica do aplicativo são utilizados diagramas UML (*Unified Modeling Language*) [53] no decorrer do texto.

5.4.1 Aquisição

A aquisição dos dados é feita com a utilização de uma classe de cliente UDP própria da biblioteca *System.Net.Sockets*, que contém classes para comunicações via Internet. As informações de porta e, ocasionalmente de grupo (para *UDP Multicast*), necessárias para a configuração do cliente UDP são armazenadas em um arquivo de configuração no diretório de execução do aplicativo de monitoramento. Tais informações são repassadas ao objeto instanciado da classe cliente UDP e a partir disso pode-se receber o fluxo de dados enviado pelo PDC à estação de trabalho.

Caso o fluxo esteja chegando normalmente à estação de trabalho

e as informações repassadas ao cliente UDP estejam corretas, o sistema começa a receber os *frames* que compõem o fluxo. A partir disso, são ativados os processos de interpretação e organização discutidos nas seções seguintes. Caso contrário, o aplicativo apresenta, após certo tempo de espera (configurado para 1 minuto), uma mensagem alertando problemas no recebimento do fluxo.

5.4.2 Interpretação

A interpretação dos dados é feita após o desempacotamento dos *frames*. Como os *frames* que compõem o fluxo possuem semelhanças, foi utilizada uma superclasse denominada *Frame* e a partir dela, utilizando o conceito de herança de MOO, foram criadas duas subclasses para a representação dos *frames* de configuração e de dados. A Figura 21 mostra a estrutura descrita.

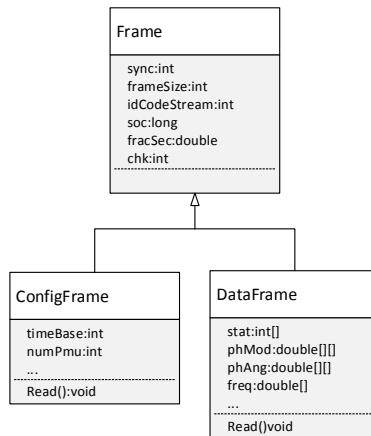


Figura 21 – Diagrama de classes - *Frames*.

Os principais atributos das classes estão relacionados aos campos mostrados nas Tabelas 1, 2 e 3 do Capítulo 4. O único método atrelado às classes é *Read()*, responsável pela leitura, interpretação e armazenamento das informações contidas nos *frames* nos atributos.

A classe *FrameConfig* é criada seguindo o padrão Singleton para que possa ser instanciada apenas uma vez. Com isso, garante-se a existência de apenas uma configuração para o fluxo de dados, independente da chegada de novos *frames* de configuração. Além disso, o padrão Singleton possibilita acessar a classe por um ponto global.

5.4.3 Organização

A organização das medidas, conforme projetado na seção 4.2.3, é implementada por terminal de medição. Com a utilização de um arquivo de configuração como o mostrado na Figura 10 monta-se uma classe denominada *SPMS*. Essa classe também é concebida sob o padrão Singleton, com isso somente pode ser instanciada uma vez e, além disso, está acessível globalmente. O acesso global neste caso é necessário para a geração de gráficos, pois todas as estruturas de dados dos terminais de medição são armazenadas na classe *SPMS*. No diagrama de classe da Figura 22 pode-se ver os principais atributos e os métodos da classe, além de sua dependência em relação à classe *DataFrame*.

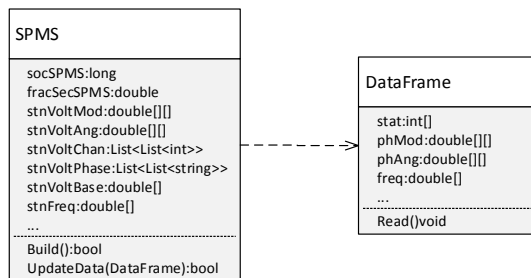


Figura 22 – Classe SPMS.

Os vetores *stnVoltMod* e *stnVoltAng* armazenam os módulos e ângulos das tensões dos canais de cada terminal de medição. As listas *stnVoltChan* e *stnVoltPhase* contêm os números dos canais e as fases das tensões monitoradas por terminal de medição. Para as correntes existem vetores (*stnCurrMod* e *stnCurrAng*) e listas (*stnCurrChan*

e *stnCurrPhase*) similares. Além disso, existem outras listas e vetores para o armazenamento de informações do arquivo de configuração, como tensões e correntes base de cada terminal; e de dados recebidos no fluxo, como frequência e variação de frequência.

O método *Build* é o responsável pela montagem dos vetores de dados de acordo com o número de terminais e de canais monitorados por esses terminais. Esse método é executado anteriormente ao recebimento do fluxo para a correta organização dos dados. Após isso, com o estabelecimento do fluxo, a cada *frame* de dados recebido o método *UpdateData* é executado. O seu argumento é justamente o *frame* de dados recebido, cujos dados são extraídos e organizados por terminal de medição nos vetores da classe *SPMS*. Um *buffer* circular com capacidade para 240 conjuntos de vetores de dados (*stnVoltMod*, *stnCurrMod* etc.) da classe *SPMS* é mantido, isso equivale a 4 segundos de fluxo a 60 *frames* por segundo. Essa escolha é justificada para evitar o consumo excessivo de memória por parte do aplicativo.

5.4.4 Monitoramento de grandezas fasoriais

O monitoramento de grandezas fasoriais pode ser feito através de gráficos temporais e/ou polares. Os gráficos temporais podem ser utilizados para o acompanhamento de várias grandezas fasoriais ao longo de vários minutos, permitindo a visualização de mudanças topológicas e outros eventos no sistema elétrico. Os gráficos polares, por sua vez, são úteis na visualização de diferenças angulares, possibilitando a identificação de perdas de sincronismo entre áreas do sistema elétrico, por exemplo.

As possibilidades de escolha para gráficos temporais são as expostas na Figura 11 do Capítulo 4. A partir da escolha do usuário, o aplicativo é configurado para apresentar graficamente as grandezas fasoriais selecionadas. Os gráficos temporais têm três parâmetros de configuração disponíveis ao usuário: resolução, comprimento da janela e intervalo de atualização. A resolução corresponde a quantidade de

fases por segundo traçada nos sinais, com quatro possibilidades de escolha: 1, 10, 30 e 60. O comprimento da janela define o intervalo de tempo (em segundos) apresentado no gráfico. Os dados anteriores ao período definido são apagados. Por fim, o intervalo de atualização define o intervalo de tempo entre sucessivas atualizações de dados no gráfico.

Para evitar sobrecargas excessivas ao aplicativo algumas limitações são impostas aos parâmetros de configuração dos gráficos. Assim, o comprimento máximo das janelas é limitado de acordo com a resolução utilizada. Como exemplos, para resolução de 1 (um) fasor por segundo, o comprimento máximo da janela é de 5 horas, enquanto que, para a resolução de 60 fasores por segundo, o comprimento máximo é de 10 minutos. Além disso, o número de gráficos temporais abertos ao mesmo tempo também é limitado em no máximo cinco.

Nos gráficos polares pode-se visualizar diferenças angulares entre fasores de tensões ou correntes de fases únicas ou de sequência positiva, tendo como referência o fasor de tensão da respectiva fase de um terminal. Os gráficos polares não possuem parâmetros configuráveis, tendo intervalo fixo de atualização de 1 (um) segundo. A quantidade de gráficos polares visualizados ao mesmo tempo é de três.

5.4.5 Identificação de modos de oscilação

Os sinais utilizados na identificação de modos de oscilação são os sinais traçados em um gráfico temporal. Para monitorar os modos de oscilação presentes nos sinais de um gráfico, deve-se definir os parâmetros do método de subespaço de estados CCA: ordem do modelo e número de linhas de blocos das matrizes de Hankel. Além disso, deve-se definir o número de segmentos nos quais as janelas de dados são divididas no método de Welch. Há um menu disponível ao usuário na janela de gráficos para essa configuração. Após a configuração dos parâmetros pode-se iniciar o processo de monitoramento de modos de oscilações eletromecânicas.

Com isso, tem-se acesso à janela de monitoramento de modos de oscilações eletromecânicas. A janela é composta basicamente por 3 gráficos. Dois dos quais apresentam ao longo do tempo os valores de frequência e taxa de amortecimento do modo dominante (maior pseudo-energia ou IDM) estimados pelo método CCA. Enquanto que o terceiro gráfico apresenta o espectro estimado pelo método de Welch.

Desde o recebimento dos dados dos sinais temporais até a atualização dos gráficos de monitoramento dos modos de oscilações eletromecânicas uma série de processos é realizada. Primeiramente, uma janela de dados dos sinais temporais traçados em um gráfico é pré-processada. Após isso, executa-se, de forma paralela, os algoritmos do método de subespaço de estados CCA e do método de Welch. Os resultados passam então por uma comparação (conforme exposto na seção 4.2.5.3), caso as estimativas sejam similares, tanto o gráfico do periodograma quanto os gráficos no tempo da janela de monitoramento de oscilações são atualizados. Caso contrário, os gráficos no tempo não são atualizados, somente o periodograma. O aplicativo executa essa sequência de processos continuamente, ou seja, após terminar a execução de uma janela de dados, inicia-se novo processo de estimação com a janela mais atual.

A dinâmica dos processos executados pode ser melhor compreendida por meio do diagrama de atividades da Figura 23.

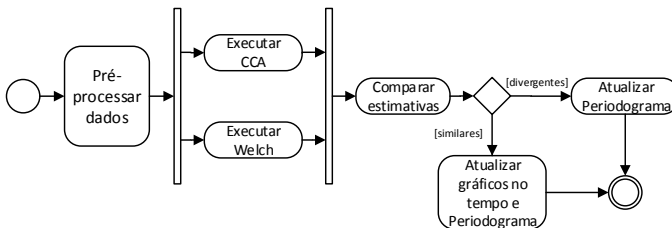


Figura 23 – Diagrama de atividades da identificação de modos de oscilação no aplicativo.

Ressalta-se que os algoritmos de identificação de modos de oscilação foram implementados utilizando o padrão de projeto Strategy.

Essa estrutura permite que novos algoritmos sejam acoplados ao sistema com maior facilidade, além de permitir mudanças de estratégias de estimação de modos em tempo de execução. A aplicação do padrão Strategy às metodologias pode ser visualizada na Figura 24.

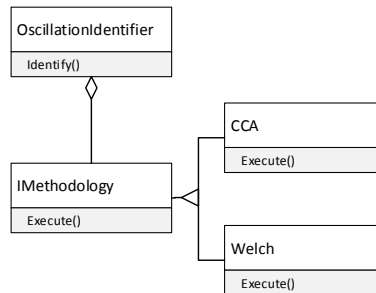


Figura 24 – Estratégias de estimação de modos de oscilação.

5.5 COMENTÁRIOS FINAIS

A modelagem e a implementação computacional do aplicativo de monitoramento proposto no Capítulo 4 foi descrita neste capítulo. O desenvolvimento do aplicativo computacional levou em conta os princípios básicos da MOO, aliados aos conceitos de padrões de projeto. Com isso, o aplicativo implementado apresenta, entre outras vantagens, flexibilidade e extensibilidade. O processo de validação do aplicativo é descrito no próximo capítulo.

6 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados experimentos realizados com o aplicativo de monitoramento desenvolvido e os respectivos resultados obtidos. Basicamente, os experimentos dividem-se em dois grupos, no primeiro grupo são utilizados dados de um sistema-teste nas análises, enquanto que no segundo grupo são utilizados registros fasoriais do SPMS MedFasee BT. Ressalta-se que em todos os experimentos foram realizados *playbacks* dos dados, de forma a simular a operação em tempo real do aplicativo de monitoramento. Resultados do desempenho computacional do aplicativo são expostos após os resultados numéricos obtidos com os experimentos.

6.2 EXPERIMENTOS COM DADOS DE SISTEMA-TESTE

Este grupo de experimentos é realizado com a utilização de sinais do sistema-teste apresentado na Figura 25 [2]. Este sistema é conhecido na literatura, sendo empregado em diversos trabalhos para a validação de metodologias. O sistema é composto por duas áreas, cada qual com dois geradores e uma carga. O interesse nos experimentos deste grupo está no monitoramento do modo eletromecânico interárea do sistema.

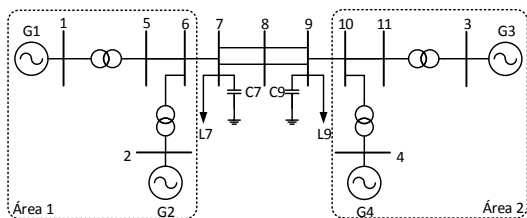


Figura 25 – Sistema-teste [2].

6.2.1 Ambiente de geração de dados

O ambiente de geração de sinais a partir do sistema-teste empregado é formado por programas computacionais desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e por um algoritmo para geração de um ruído branco Gaussiano, baseado em [54] e implementado em [55].

Primeiramente, o programa Anarede é utilizado para a execução do fluxo de potência do sistema a partir de informações das potências fornecidas pelos quatro geradores e das potências consumidas pelas duas cargas do sistema. O resultado de fluxo obtido com o Anarede é uma das informações de entrada para o programa Anatem, de análises de transitórios eletromecânicos em SEE.

Além das informações de fluxo de potência, pode-se fornecer ao Anatem dados referentes a perturbações nas barras do sistema. Nos experimentos deste trabalho as perturbações simuladas são pequenas variações aleatórias nas barras de carga, de maneira a simular períodos de dados de ambiente. Esses valores aleatórios injetados nas barras de carga são gerados em um algoritmo implementado no Matlab. As amplitudes das perturbações são calculadas com a utilização da função *wgn* do Matlab, que consiste em um gerador de ruído branco Gaussiano. Além disso, o instante de tempo no qual a perturbação é injetada também é aleatório dentro de uma distância máxima entre dois valores consecutivos, definido pelo intervalo total de tempo simulado.

Os resultados simulados no Anatem, considerando o resultado de fluxo de potência fornecido pelo Anarede e a injeção dos ruídos brancos Gaussianos nas barras de carga são a entrada do aplicativo de monitoramento de modos eletromecânicos. O ambiente de simulação pode ser melhor compreendido por meio da Figura 26.

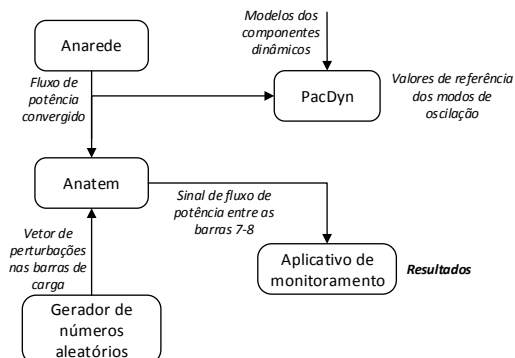


Figura 26 – Ambiente de geração de dados de sistema-teste.

6.2.2 Metodologia

O programa PacDyn, de análises de estabilidade a pequenas perturbações do CEPEL, foi utilizado para a simulação dinâmica do sistema-teste e caracterização de seus modos eletromecânicos. Para isso, o PacDyn necessita de um ponto de operação, fornecido pela execução de um fluxo de potência no programa Anarede. Neste caso, o fluxo executado considerou as cargas nas barras 7 e 9 com valores nominais, 967 MW e 1.767 MW, respectivamente. As características do modo interárea do sistema estimadas pelo PacDyn são apresentadas na Tabela 4. Esses valores são tomados como referência nas simulações realizadas com dados do sistema-teste.

Tabela 4 – Características modais obtidas com o PacDyn.

| Frequência (Hz) | Taxa de amortecimento (%) |
|-----------------|---------------------------|
| 0,697 | 9,415 |

O sinal escolhido para o monitoramento do modo interárea do sistema-teste é o fluxo de potência entre as barras 7 e 8. Como as duas áreas são conectadas apenas por essa interligação (barras 7, 8 e 9) presume-se que o sinal de fluxo entre as barras 7 e 8 apresenta boa

observabilidade do modo interárea.

Com o Anatem foram gerados sinais de fluxo de potência com duração de 15 minutos e resolução de 30 pontos por segundo. Três simulações foram realizadas considerando variações nas amplitudes dos ruídos inseridos nas barras de carga. Essas amplitudes são de 0, 5, 1 e 2% dos valores das cargas nas respectivas barras.

No “Caso I”, com 1% de ruído aplicado às barras, realiza-se a sintonia dos métodos de estimação de modos do aplicativo de monitoramento. Ou seja, são realizadas alterações nos parâmetros de entrada dos métodos para a observação de suas influências nas estimações. As conclusões obtidas a partir dessas observações são úteis nas simulações seguintes, dos casos II e III, nos quais o nível de ruído inserido nas barras é alterado.

Os parâmetros alterados são:

- Número de linhas de blocos nas matrizes de Hankel - método CCA;
- Ordem definida para o modelo estimado - método CCA;
- Tamanho da janela de dados - ambos os métodos.

Variações no número de segmentos nas janelas de análises considerados pelo método de Welch foram feitas conjuntamente com as variações nos tamanhos das janelas de dados. Isto foi feito para manter a tolerância nas comparações de estimativas dos métodos CCA e de Welch, estabelecida pela Equação (4.9).

6.2.3 Resultados

6.2.3.1 Caso I

O objetivo principal deste caso é realizar a sintonia dos parâmetros dos métodos que garanta os melhores resultados para as simulações seguintes. Dessa forma, os parâmetros de entrada dos métodos de identificação foram modificados um a um para verificação dos efeitos nos

resultados. O sinal de fluxo de potência utilizado nas análises, influenciado pelas injeções de variações aleatórias nas cargas, é apresentado na Figura 27.

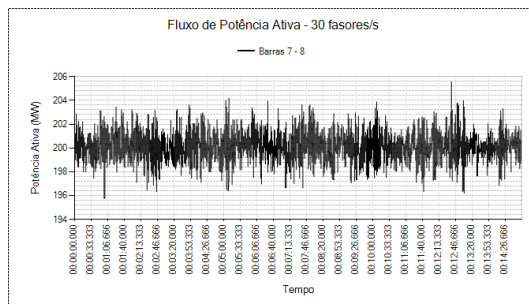


Figura 27 – Sinal monitorado no Caso I.

6.2.3.1.1 Número de linhas de blocos nas matrizes de Hankel - método CCA

O número de linhas de blocos das matrizes de Hankel do método CCA foi testado com 4 valores diferentes. Na Tabela 5 são apresentados os resultados de médias e desvios-padrão das frequências (\bar{f} , σ_f) e das taxas de amortecimento ($\bar{\zeta}$, σ_ζ) do modo identificado como dominante (utilizando as duas métricas de ordenação modal apresentadas na seção 4.2.5.2.2) ao longo do período analisado. Ou seja, para todas as janelas de análise executadas, à medida que os dados foram reproduzidos em tempo real. Os demais parâmetros de entrada foram mantidos fixos, sendo: a ordem do sistema igual a 12; o comprimento da janela de análise igual a 5 minutos; e o número de segmentos no qual a janela é dividida no método de Welch igual a 10.

Não houve grandes alterações nas médias e desvios-padrão tanto das frequências quanto das taxas de amortecimento estimadas. Os valores obtidos ao utilizar a ordenação por IDM mostram valores de taxas de amortecimento mais próximos do valor fornecido pelo programa PacDyn. No entanto, os valores de frequência estimados estão relati-

Tabela 5 – Resultados encontrados variando o número de linhas de blocos nas matrizes de Hankel do método CCA.

| Nº linhas | Pseudo-energia | | | | IDM | | | |
|--------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 80 | 100 | 120 | 140 | 80 | 100 | 120 | 140 |
| \bar{f} (Hz) | 0,622 | 0,617 | 0,621 | 0,627 | 0,615 | 0,611 | 0,607 | 0,613 |
| σ_f (Hz) | 0,039 | 0,028 | 0,030 | 0,030 | 0,044 | 0,033 | 0,041 | 0,042 |
| $\bar{\zeta}$ (%) | 9,154 | 8,391 | 7,487 | 7,361 | 9,423 | 9,874 | 9,326 | 8,565 |
| σ_ζ (%) | 4,412 | 3,588 | 4,505 | 3,731 | 3,815 | 3,644 | 5,093 | 4,074 |

vamente distantes do valor de referência do PacDyn (Tabela 4).

Para verificar o conteúdo espectral do sinal utilizado na análise, aplica-se a DFT à primeira janela de execução do aplicativo de monitoramento, ou seja à janela compreendida entre 00:00:00 e 00:05:00 na Figura 27. O resultado do espectro de frequências dessa janela de dados é apresentado na Figura 28.

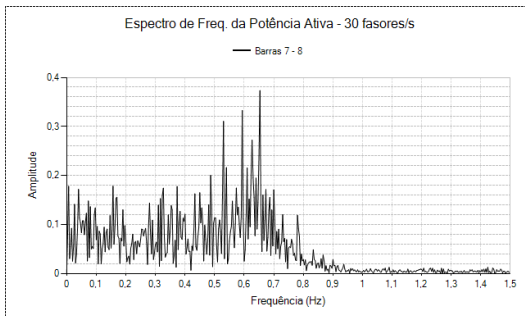


Figura 28 – Espectro de frequências dos primeiros 5 minutos do sinal monitorado no Caso I.

O espectro mostra que há predominância de frequências no sinal entre a 0,6 e 0,7 Hz. O pico de maior amplitude para esta janela encontra-se na frequência de 0,653 Hz. No entanto, para outras janelas de análise, as maiores amplitudes variam em torno de 0,6 a 0,65 Hz. Isto corrobora os resultados encontrados pelo aplicativo de monitoramento. Assim, apesar de o programa PacDyn determinar como 0,697 Hz a frequência do modo interárea, o sinal de fluxo de potência utili-

zado na análise (considerando janelas de 5 minutos de dados) apresenta predominância de frequências mais baixas, próximas a 0,6 Hz.

6.2.3.1.2 Ordem definida para o modelo estimado - método CCA

A ordem do modelo foi alterada entre quatro valores: 6, 12, 18 e 24. Nas simulações, os outros parâmetros foram mantidos fixos como: número de linhas de blocos nas matrizes de Hankel igual a 80; o tamanho da janela de análise igual a 5 minutos; e o número de segmentos no qual a janela é dividida pelo método de Welch igual a 10.

Na Tabela 6 os resultados obtidos são agrupados. A simulação considerando a ordem igual a 12 já havia sido realizada anteriormente, ao simular a variação no número de linhas de blocos nas matrizes de Hankel.

Tabela 6 – Resultados encontrados variando a ordem do modelo.

| Ordem | Pseudo-energia | | | | IDM | | | |
|--------------------|----------------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| | 6 | 12 | 18 | 24 | 6 | 12 | 18 | 24 |
| \bar{f} (Hz) | 0,619 | 0,622 | 0,600 | 0,602 | 0,623 | 0,615 | 0,602 | 0,603 |
| σ_f (Hz) | 0,012 | 0,039 | 0,040 | 0,039 | 0,012 | 0,044 | 0,042 | 0,040 |
| $\bar{\zeta}$ (%) | 8,907 | 9,154 | 13,061 | 14,897 | 9,095 | 9,423 | 13,733 | 15,235 |
| σ_ζ (%) | 1,096 | 4,412 | 7,478 | 8,084 | 0,975 | 3,815 | 6,582 | 7,329 |

Nota-se que ao considerar ordens mais elevadas (18 e 24) as dispersões nos valores de amortecimento ficam elevadas. Ou seja, os desvios-padrão dessas medidas crescem. Isto não é visivelmente observado nos valores de frequências. O que ocorre é que são identificados modos espúrios com frequências similares às do modo real, confirmada pelo Periodograma de Welch, mas com taxas de amortecimento bem maiores que as reais. Dessa forma, os valores médios das taxas de amortecimento tornam-se elevados, o que resulta também em maiores desvios-padrão entre as estimativas. Em resumo, as métricas de ordenação pelos cálculos da pseudo-energia e do IDM mostraram ineficiências na identificação do modo real para ordens mais elevadas.

6.2.3.1.3 Tamanho da janela de dados

Nesta etapa, o tamanho da janela de análise é alterado entre 4, 6, 8 e 10 minutos. O período total monitorado é o mesmo das simulações anteriores, 15 minutos de dados. Dessa forma, ao escolher a janela com tamanho de 10 minutos tem-se apenas 5 minutos finais do período monitorados. Por outro lado, ao escolher a janela com 4 minutos tem-se 11 minutos monitorados. Essa é uma importante ressalva ao considerar os resultados de valores médios e desvios-padrão apresentados a seguir na Tabela 8, uma vez que à medida que o tamanho da janela é aumentado o número de valores utilizados para o cálculo das médias e de desvios-padrão é reduzido.

Para manter a mesma resolução nos periodogramas estimados pelo método de Welch, variou-se o número de segmentos nos quais a janela de análise é dividida. Por exemplo, nas simulações anteriores o tamanho de janela utilizado é igual a 5 minutos e o número de segmentos utilizado pelo método de Welch é igual a 10. Considerando que a resolução do sinal, após o processo de dizimação, é igual a 5 Hz, pode-se calcular o número de pontos por segmento e a respectiva resolução dos periodogramas respectivamente como:

$$L = \frac{300 \text{ s} \times 5 \text{ Hz}}{10 \text{ segmentos}} = 150 \text{ pontos/segmento} \quad (6.1a)$$

$$\Delta f = \frac{1}{L} = \frac{1}{150} = 0,033 \text{ Hz} \quad (6.1b)$$

A resolução calculada em (6.1b) foi mantida nas simulações realizadas nesta etapa. Os números de segmentos empregados no método de Welch para os tamanhos de janelas utilizados nas simulações são mostrados na Tabela 7.

A ordem do sistema foi mantida fixa em 12 e o número de linhas de blocos em 100. Os resultados considerando diferentes tamanhos de janela são apresentados na Tabela 8.

O aumento no tamanho das janelas de análise representa: redução nos valores de média (ainda que com leve oscilação por IDM) e desvio-

Tabela 7 – Número de segmentos utilizados nas simulações.

| Janela (min.) | Nº de segmentos - L |
|---------------|-----------------------|
| 4 | 8 |
| 6 | 12 |
| 8 | 16 |
| 10 | 20 |

Tabela 8 – Resultados encontrados variando o tamanho da janela de análise.

| $Jan.(min.)$ | Pseudo-energia | | | | IDM | | | |
|--------------------|----------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| | 4 | 6 | 8 | 10 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| \bar{f} (Hz) | 0,632 | 0,623 | 0,600 | 0,597 | 0,614 | 0,619 | 0,605 | 0,608 |
| σ_f (Hz) | 0,028 | 0,046 | 0,027 | 0,021 | 0,044 | 0,045 | 0,034 | 0,028 |
| $\bar{\zeta}$ (%) | 8,156 | 10,964 | 13,971 | 16,130 | 9,162 | 10,249 | 12,997 | 13,707 |
| σ_ζ (%) | 4,811 | 5,381 | 4,157 | 5,060 | 4,738 | 4,013 | 4,218 | 5,488 |

padrão das estimativas de frequência; elevação nos valores de média das estimativas de taxa de amortecimento e oscilação nos valores de desvio-padrão destas estimativas.

A elevação nos valores médios de amortecimento é o resultado a ser destacado. Apesar de a teoria dos métodos de subespaço de estados indicar a utilização de janelas extensas de análise, percebe-se por esses resultados que, com isso, modos com frequências menores, mesmo que mais amortecidos, passam a ser identificados como dominantes em mais janelas de análise. Por isso, há redução na média das estimativas de frequência e aumento na média das estimativas de taxa de amortecimento.

6.2.3.2 Caso II

Neste caso o nível de ruído aplicado nas barras 7 e 9 foi reduzido para 0,5% das cargas respectivas. Novamente, o sinal de fluxo de potência em uma das LTs entre as barras 7 e 8 foi utilizado no monitoramento. Pode-se visualizar o sinal na Figura 29.

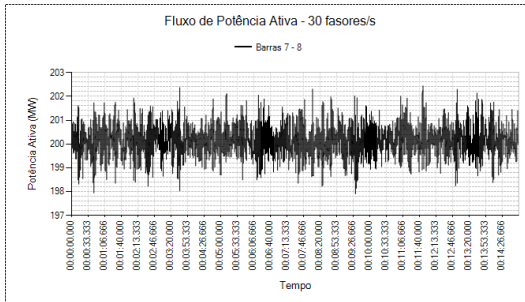


Figura 29 – Sinal monitorado no Caso II.

Mais uma vez, faz-se uma análise prévia do espectro de frequências do sinal base da análise. O resultado, apresentado na Figura 30, é praticamente idêntico ao estimado para o Caso I. Devido ao nível de ruído mais baixo as amplitudes estimadas no espectro também são menores.

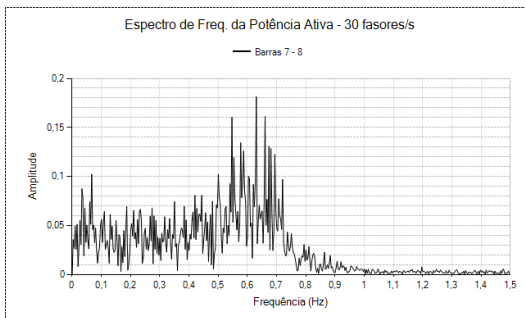


Figura 30 – Espectro de frequências dos primeiros 5 minutos do sinal monitorado no Caso II.

Seguindo indicativos do Caso I, a ordem foi mantida como 12, o número de linhas de blocos em 100, o tamanho da janela de análise igual a 6 minutos e o número de segmentos no qual essa janela é dividida no método de Welch igual a 12. Os resultados encontrados são listados na Tabela 9.

Apesar da redução no nível de ruídos injetados nas barras de

Tabela 9 – Resultados de estimação para o Caso II.

| | Pseudo-energia | IDM |
|--------------------|----------------|-------|
| \bar{f} (Hz) | 0,655 | 0,649 |
| σ_f (Hz) | 0,026 | 0,031 |
| $\bar{\zeta}$ (%) | 6,030 | 8,832 |
| σ_ζ (%) | 4,292 | 3,605 |

carga, os resultados apresentam os valores de frequência condizentes com o espectro de frequências apresentado na Figura 30. As médias das taxas de amortecimento são inferiores aos resultados do Caso I, quando utilizando os mesmos parâmetros para os métodos. Em geral, essa é uma tendência observada, a obtenção de taxas de amortecimento menores do que as reais, quando as amplitudes das variações aleatórias nas cargas têm níveis muito baixos.

6.2.3.3 Caso III

Agora, o nível de ruído nas barras 7 e 9 é elevado para 2% das cargas nas respectivas barras. O fluxo de potência entre as barras 7 e 8 nesse caso, tem alterações mais significativas ao longo do tempo, conforme mostra a Figura 31.

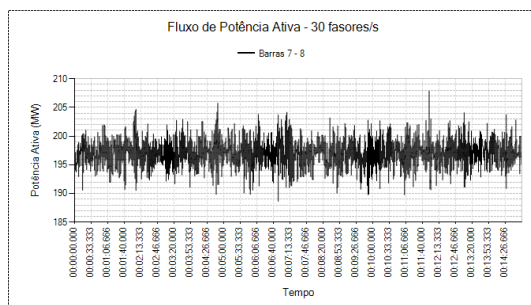


Figura 31 – Sinal monitorado no Caso III.

O espectro de frequências de uma janela de 5 minutos deste sinal é similar aos espectros dos sinais nos casos I e II. Dessa forma, omite-se

essa informação neste caso. Os valores médios e os desvios-padrão de frequências e taxas de amortecimento estimados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de estimação para o Caso III.

| | Pseudo-energia | IDM |
|--------------------|----------------|-------|
| \bar{f} (Hz) | 0,650 | 0,644 |
| σ_f (Hz) | 0,023 | 0,022 |
| $\bar{\zeta}$ (%) | 8,160 | 8,967 |
| σ_ζ (%) | 2,714 | 2,541 |

O resultado mais expressivo é a redução nos valores de desvio-padrão das taxas de amortecimento estimadas, em relação aos casos I e II. Como os níveis de ruído injetados nas barras neste caso é maior, o modo monitorado fica mais excitado, facilitando a sua identificação. Dessa forma, em mais janelas é possível identificar o modo real, com frequência e taxa de amortecimento corretas, reduzindo a identificação de modos espúrios e conseqüentemente os desvios-padrão dos valores estimados.

6.3 EXPERIMENTOS COM DADOS DO SPMS MEDFASEE BT

6.3.1 Ambiente de geração de dados

Os dados utilizados neste conjunto de experimentos são grandezas fasoriais provenientes do SPMS MedFasee BT, descrito na seção 1.1.1. As grandezas fasoriais geradas pelas PMUs do sistema são enviadas por meio da Internet até o PDC, localizado no LabPlan/UFSC, em Florianópolis. Por meio do ambiente de análise *off-line* MedPlot [56], realizam-se consultas de dados históricos na base de dados desse PDC. Os arquivos resultantes do processo de consultas do MedPlot são utilizados como entrada do aplicativo desenvolvido neste trabalho. Com os dados contidos nos arquivos, que podem ser módulos e ângulos de fasores de tensão ou corrente, frequências e fluxos de potências ativas

e reativas faz-se um *playback*, simulando a operação em tempo real do aplicativo de monitoramento. A função de *playback* é interna do aplicativo de monitoramento. O ambiente de geração de dados como um todo pode ser melhor compreendido por meio da Figura 32.

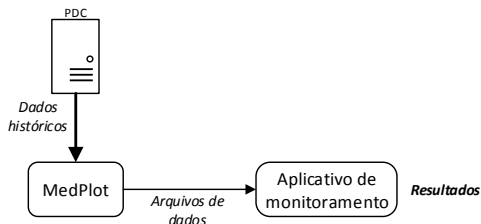


Figura 32 – Ambiente de geração de dados do SPMS MedFasee BT.

6.3.2 Metodologia

Os registros históricos gerados no ambiente descrito na seção anterior são utilizados neste grupo de experimentos para a identificação de modos eletromecânicos interárea do SIN. As faixas de frequência de oscilação dos principais modos interárea do SIN estão listadas na Tabela 11 [?, 57].

Tabela 11 – Principais modos interárea no SIN.

| Modo | Frequência (Hz) |
|-------------------|-----------------|
| Norte-Sul | 0,2 a 0,4 |
| Sul-Sudeste | 0,6 a 0,8 |
| Norte-Nordeste | 0,55 a 0,65 |
| Acre/Rondônia-SIN | 0,4 a 0,7 |

A seguir, apresenta-se o monitoramento de dois desses modos: o modo Norte-Sul e o modo Acre/Rondônia-SIN. O modo Norte-Sul é resultado da interação entre as áreas Norte/Nordeste e Sul/Sudeste/Centro-Oeste. O modo Acre/Rondônia-SIN representa a interação do subsistema formado pelos dois estados em relação ao restante do

SIN. Estudos acerca deste modo são recentes considerando que o subsistema Acre/Rondônia passou a fazer parte do SIN apenas no dia 23 de outubro de 2009 [58].

O monitoramento do modo eletromecânico interárea Norte-Sul do SIN foi realizado por um período de 1 hora, entre as 14:00:00 e 15:00:00 do dia 25 de agosto de 2014. Foram realizadas duas análises: a primeira utilizando apenas o sinal de diferenças angulares entre as tensões de sequência positiva dos terminais UFPE e USP_SC (define-se o terminal USP_SC como referência angular); a segunda empregando também o sinal de diferenças angulares entre as tensões de sequência positiva dos terminais UFRGS e USP_SC (novamente definindo o terminal USP_SC como referência angular).

O monitoramento do modo Acre/Rondônia-SIN também foi feito em um período de uma hora, entre 18:00:00 e 19:00:00 do dia 22 de junho de 2014. Nesta análise empregou-se o sinal de diferenças angulares entre as tensões de sequência positiva dos terminais UFAC e UnB (tomando o terminal UnB como referência angular).

Para a escolha dos sinais utilizados no monitoramento dos modos, foi realizada uma análise espectral prévia com a utilização da DFT. Com isso, pôde-se identificar os sinais com maiores observabilidades em relação aos modos monitorados.

Empregam-se nas análises para o monitoramento de ambos os métodos janelas de dados com 10 minutos. Escolhem-se ainda como parâmetros para o método de CCA: ordem igual a 20 para os modelos estimados e número de linhas de blocos das matrizes de Hankel igual a 120. Para o método de Welch divide-se cada janela de 10 minutos de dados em 20 segmentos, com sobreposição de 50% entre segmentos adjacentes.

6.3.3 Resultados - Modo Norte-Sul

6.3.3.1 Análise monossinal

O sinal de diferença angular entre os terminais UFPE e USP_SC, utilizado nesta análise pode ser visualizado na Figura 33.

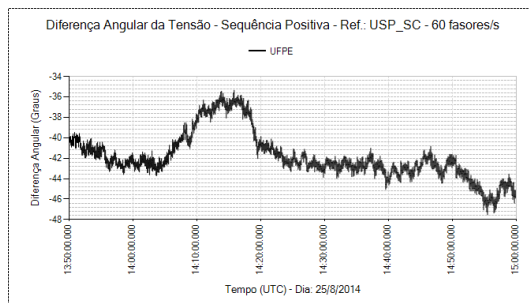


Figura 33 – Sinal para o monitoramento do modo Norte-Sul.

As Figuras 34 e 35 mostram, respectivamente, a evolução temporal da frequência e taxa de amortecimento do modo eletromecânico mais expressivo seguindo as duas métricas de ordenação dos métodos empregadas neste trabalho: cálculo da pseudo-energia (pontos em vermelho) e cálculo do IDM (pontos em azul).

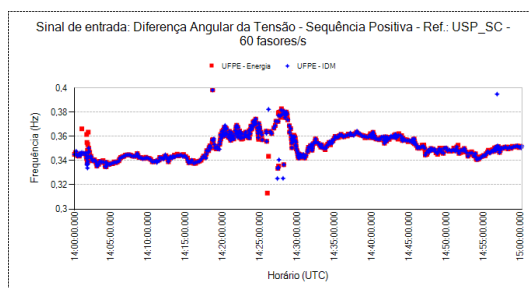


Figura 34 – Frequência estimada do modo Norte-Sul.

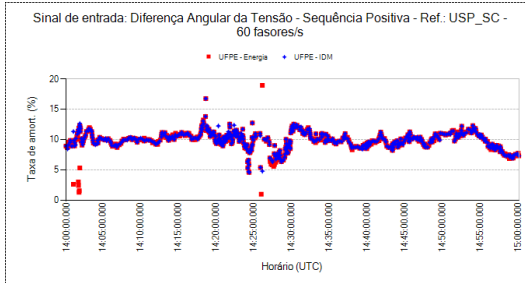


Figura 35 – Taxa de amortecimento estimada do modo Norte-Sul.

Pode-se observar que para várias execuções dos algoritmos as duas metodologias de ordenação identificam os mesmos modos como os mais expressivos. A metodologia de ordenação pelo cálculo da pseudo-energia teve 1.611 resultados concordantes com o método de Welch enquanto que a metodologia de ordenação por IDM foi concordante em 1.589 janelas de dados, esse é o número de pontos traçados em cada série (vermelha e azul, respectivamente) dos gráficos.

Em geral, é possível acompanhar de maneira nítida a tendência de evolução no tempo dos valores de frequência de oscilação e taxa de amortecimento. Entre as 14:20:00 e 14:30:00 percebem-se as maiores excursões nos níveis de frequências e taxas de amortecimento estimados. Essa excursão deve estar relacionada às excursões no sinal base de diferença angular (Figura 33), que pode representar variações no intercâmbio de potência entre as duas regiões.

6.3.3.2 Análise multissinal

Para tentar melhorar o desempenho da estimação na análise monossinal, são utilizados agora dois sinais de diferenças angulares como entrada para os métodos. Além do sinal de diferença angular utilizado na análise monossinal emprega-se o sinal de diferença angular entre os terminais UFRGS e USP_SC. Os dois sinais, tomando o terminal USP_SC como referência são apresentados na Figura 36.

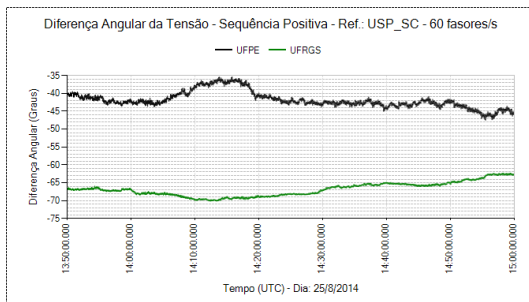


Figura 36 – Sinais para o monitoramento do modo Norte-Sul.

Para este caso, as evoluções temporais das frequências e taxas de amortecimento estimadas são apresentadas nas Figuras 37 e 38, respectivamente.

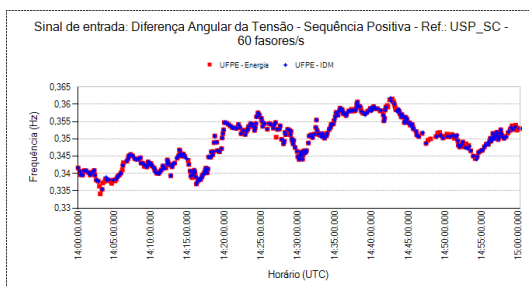


Figura 37 – Frequência estimada do modo Norte-Sul.

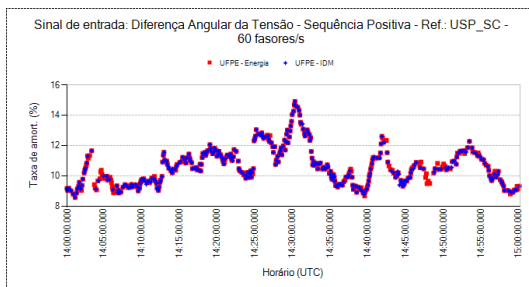


Figura 38 – Taxa de amortecimento estimada do modo Norte-Sul.

As formas modais do modo Norte-Sul para cada um dos sinais de diferenças angulares (UFPE x USP_SC e UFRGS x USP_SC) também foram estimadas para cada execução do algoritmo de CCA. Os módulos das diferenças nos ângulos das formas modais dos dois sinais são apresentados na Figura 39. Percebe-se que os valores ficam entre 140 e 180 graus. Apesar dessa faixa de valores não estar muito bem concentrada em torno de 180 graus, os valores indicam o caráter interárea do modo. Ou seja, os valores indicam oposição de fase entre os dois sinais, gerados a partir de terminais das duas áreas responsáveis pela interação que o modo representa.

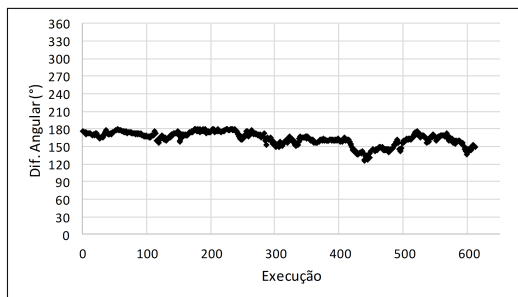


Figura 39 – Diferenças angulares entre as formas modais dos sinais.

6.3.3.3 Síntese dos resultados

A Tabela 12 é a síntese dos resultados encontrados nas análises mono e multissinal. Assim como nas simulações realizadas com o sistema-teste, apresentam-se as médias e os desvios-padrão de frequências e taxas de amortecimento ao longo do período analisado. Os valores médios de frequências e taxas de amortecimento praticamente não se alteram nos dois casos. Nesse sentido, o resultado mais expressivo é o da redução nos desvios-padrão das estimativas, tanto para os valores de frequência quanto para os valores de taxa de amortecimento. Ou seja, a utilização de mais sinais nos quais pode-se observar o modo de interesse reduz as dispersões nos resultados.

Tabela 12 – Tabela síntese dos resultados do monitoramento do modo Norte-Sul.

| | Monossinal | | Multissinal | |
|--------------------|----------------|--------|----------------|--------|
| | Pseudo-energia | IDM | Pseudo-energia | IDM |
| \bar{f} (Hz) | 0,349 | 0,349 | 0,349 | 0,349 |
| σ_f (Hz) | 0,010 | 0,010 | 0,006 | 0,006 |
| $\bar{\zeta}$ (%) | 10,087 | 10,299 | 10,571 | 10,588 |
| σ_ζ (%) | 1,950 | 2,139 | 1,209 | 1,248 |

6.3.4 Resultados - Modo Acre/Rondônia-SIN

O sinal base utilizado na análise é de diferença angular entre os terminais UFAC e UnB, podendo ser visualizado na Figura 40.

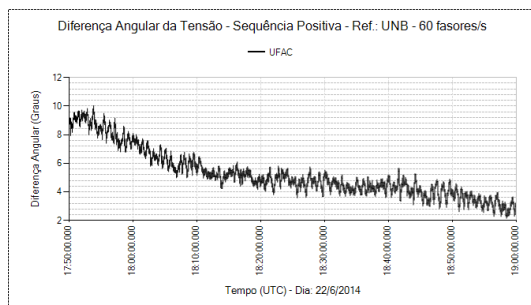


Figura 40 – Sinal para o monitoramento do modo Acre/Rondônia-SIN.

Novamente comparam-se os resultados das duas técnicas de ordenação dos modos de oscilação. Os resultados obtidos com o aplicativo de monitoramento são mostrados nas Figuras 41 e 42, com os valores estimados de frequência de oscilação e taxa de amortecimento do modo monitorado.

Nos gráficos das Figuras 41 e 42 pode-se ver que o número de pontos traçados com a ordenação pela pseudo-energia é bem superior ao número de pontos traçados com ordenação por IDM. Isso significa que a ordenação por pseudo-energia é concordante em mais janelas de análise com os resultados do método de Welch que a ordenação por

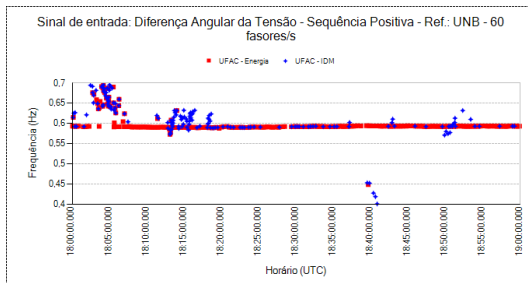


Figura 41 – Frequência estimada do modo Acre/Rondônia-SIN.

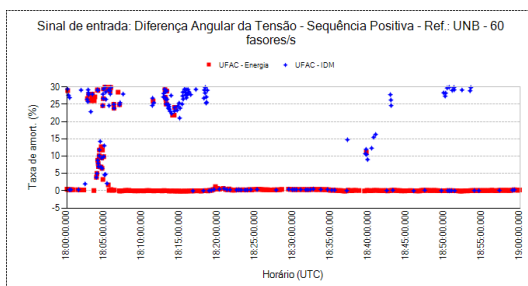


Figura 42 – Taxa de amortecimento estimada do modo Acre/Rondônia-SIN.

IDM. No total estão representados 1.406 pontos na série de pseudo-energia e apenas 233 na série de IDM. Além disso, nota-se claramente que os pontos identificados pelo IDM apresentam elevadas taxas de amortecimento (Figura 42), diferindo muito dos resultados encontrados pela ordenação por pseudo-energia. Em resumo, a conclusão é que a ordenação por IDM encontra dificuldades neste caso, identificando modos espúrios com altas taxas de amortecimento como os modos dominantes.

Na Tabela 13 estão sintetizados os resultados numéricos obtidos. Os valores comprovam a ineficiência da ordenação por IDM nesta análise, sobretudo na média e desvio-padrão dos valores de taxas de amortecimento do modo dominante identificado.

Tabela 13 – Resultados do monitoramento do modo Acre/Rondônia-SIN.

| | Pseudo-energia | IDM |
|--------------------|----------------|--------|
| \bar{f} (Hz) | 0,594 | 0,607 |
| σ_f (Hz) | 0,015 | 0,045 |
| $\bar{\zeta}$ (%) | 1,367 | 15,284 |
| σ_ζ (%) | 5,372 | 12,676 |

6.4 DESEMPENHO COMPUTACIONAL

O desempenho computacional do aplicativo desenvolvido é medido nesta seção em termos dos tempos médios para a realização das atividades relacionadas à identificação dos modos eletromecânicos. Essas atividades são: pré-processamento dos dados; execução dos algoritmos dos métodos CCA e Welch; comparação das estimativas obtidas e atualização dos gráficos (Figura 23).

A configuração do computador utilizado nos testes de desempenho é a seguinte: processador Intel Core i7 3,4 Ghz, 8 GB de memória RAM.

6.4.1 Influência dos parâmetros de entrada dos métodos

A influência das variações dos parâmetros de entrada dos métodos de identificação, realizadas nas seções 6.2.3.1.1, 6.2.3.1.2 e 6.2.3.1.3, nos tempos computacionais são resumidas na Tabela 14. Os outros parâmetros mantidos fixos em cada série de alterações são os mesmos considerados nas análises das seções citadas. Por exemplo, ao variar o número de linhas de blocos nas matrizes de Hankel os demais parâmetros são fixados como: ordem do modelo igual a 12, tamanho da janela de análise igual a 5 minutos e número de segmentos nos quais dividem-se as janelas de dados no método de Welch igual a 10.

Percebe-se que alterações no tamanho das janelas de dados empregadas no monitoramento são as que mais influenciam em mudanças

Tabela 14 – Influência da variação de parâmetros dos métodos de identificação no desempenho computacional do aplicativo.

| Nº linhas | 80 | 100 | 120 | 140 |
|-----------------------|-----------|------------|------------|------------|
| \bar{T}_{exec} (ms) | 374 | 405 | 445 | 480 |
| Ordem | 6 | 12 | 18 | 24 |
| \bar{T}_{exec} (ms) | 344 | 374 | 528 | 550 |
| Jan. (min.) | 4 | 6 | 8 | 10 |
| \bar{T}_{exec} (ms) | 333 | 415 | 473 | 632 |

nos tempos de execução dos processos. Isso se deve, sobretudo, ao aumento no número de colunas das matrizes de Hankel do método CCA, cuja execução representa de 85 a 95% do tempo total de cada execução.

6.4.2 Influência do número de sinais utilizados

Nesta seção são comparados os tempos médios de execução das análises efetuadas para o monitoramento do modo Norte-Sul, nas seções 6.3.3.1 e 6.3.3.2. Com isso, pode-se verificar a variação dos tempos de execução ao utilizar um ou dois sinais, obtendo um indicativo da influência do número de sinais no desempenho computacional.

Na Tabela 15 são apresentados os tempos médios das execuções para as duas análises. Lembrando que a resolução dos sinais é de 60 fasores por segundo e os parâmetros empregados são os previamente citados nas seções de resultados numéricos das simulações.

Tabela 15 – Influência do número de sinais utilizados no desempenho computacional do aplicativo.

| Nº sinais | 1 | 2 |
|-----------------------|----------|----------|
| \bar{T}_{exec} (ms) | 2.119 | 3.911 |

Primeiramente, um resultado secundário dessa análise entra na linha do aumento de dados na janela, já que a resolução dos sinais destas simulações (60 fasores por segundo) é o dobro da resolução dos

sinais das simulações com o sistema-teste (30 fasores por segundo).

A adição de um sinal à análise praticamente dobra o tempo médio de execução. Este aumento de tempo ocorre devido ao aumento do número de linhas das matrizes de Hankel do método CCA e ao aumento de dimensões de outras matrizes manipuladas no interior do algoritmo.

6.5 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os experimentos realizados e os resultados obtidos com a aplicação do aplicativo de monitoramento implementado no trabalho. Para isso, foram utilizados sinais de um sistema-teste e registros fasoriais reais de PMUs.

Nas simulações realizadas com sinais de sistema-teste foi possível obter importantes conclusões acerca da calibração dos métodos de identificação implementados no aplicativo de monitoramento desenvolvido. Por exemplo, verificou-se que alterações entre os valores de 80 a 140 no número de linhas de blocos das matrizes de Hankel do método CCA não surtiram efeitos significativos nos resultados. Por outro lado, o aumento no valor atribuído à ordem do modelo considerado pelo método CCA deteriorou o desempenho de ambas as métricas de ordenação empregadas (pseudo-energia e CCA). Além disso, o aumento no tamanho das janelas de análise foi responsável por elevar os valores de média de taxas de amortecimento e reduzir os valores de média de frequência estimados, devido a identificação de modos mais lentos como sendo os dominantes.

Outras simulações foram feitas alterando os níveis de ruídos inseridos nas barras de carga do sistema-teste. A elevação dos níveis de ruído ocasionou maior excitação no modo interárea monitorado, o que resultou em reduções nos valores de desvios-padrão das estimativas.

Após a realização de simulações com sinais do sistema-teste, foram utilizados registros fasoriais do SPMS MedFasee BT no monitoramento de dois modos eletromecânicos interárea do SIN. Primeiramente, foi monitorado o modo Norte-Sul por um período de uma hora, com

valores médios de frequência de 0,349 Hz e de taxa de amortecimento de aproximadamente 10 %. A utilização de mais de um sinal da análise reduziu os desvios-padrão nas medidas, garantindo maior precisão nas estimativas. Além disso, na análise multissinal foi possível realizar o cálculo das formas modais associadas a cada sinal empregado, o que permitiu a comprovação do caráter interárea do modo identificado.

Por fim, o modo interárea Acre/Rondônia-SIN foi monitorado também durante uma hora, com valores médios de frequência e taxa de amortecimento identificados pelo cálculo da pseudo-energia como, aproximadamente, 0,6 Hz e 1,367 %. A ordenação pelo cálculo do IDM mostrou-se bastante inadequada para este monitoramento, com obtenção de média de estimativas de taxa de amortecimento bem elevada (15,284 %), assim como de desvio-padrão (12,676 % contra 5,372 % pelo cálculo da pseudo-energia).

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento e a aplicação de técnicas de identificação em tempo real de modos eletromecânicos em SEE. Para isso foi projetado e implementado um aplicativo de monitoramento baseado em duas técnicas de estimação de modos de oscilação baseadas em medidas: o método de subespaço de estados CCA e o método de Welch.

No projeto foram consideradas características necessárias à aplicação das técnicas de identificação, como o pré-processamento das medidas empregadas nas estimações e a possibilidade de alteração dos parâmetros de entrada dos métodos, para calibração de acordo com as necessidades dos usuários. Além disso, a implementação do aplicativo com a utilização de conceitos de MOO, aliados à teoria de padrões de projeto garante características como flexibilidade e expansibilidade ao aplicativo desenvolvido. Isto facilita a atualização e expansão do aplicativo por meio de alterações e inclusões de novas metodologias de identificação de modos eletromecânicos.

A experimentação do aplicativo de monitoramento foi feita com a utilização de dados de um sistema-teste de 11 barras e registros fasoriais do SPMS MedFasee BT. As simulações considerando os sinais do sistema-teste foram utilizadas para a calibração dos parâmetros de entrada dos métodos de identificação e verificação da influência dos níveis de ruído injetados nas barras de carga do sistema na identificação do modo eletromecânico dominante.

Os resultados mostraram influência baixa nos resultados quando foram feitas alterações do número de linhas de blocos nas matrizes de Hankel do método CCA. Alterações nos valores de ordem dos modelos construídos pelo método CCA mostraram deterioração na estimação

quando foram atribuídos valores elevados de ordens aos modelos (18 e 24). Isto porque foram criados modos com frequências similares à frequência do modo de interesse, possuindo no entanto elevados valores de taxas de amortecimento. Tais resultados destacam pontos fracos das técnicas de ordenação de modos (cálculos de pseudo-energia e de IDM) empregadas neste trabalho. Por último, o aumento do tamanho da janela de análise que deveria melhorar os resultados, quando considerando a teoria dos métodos de subespaço de estados, ocasionou afastamentos dos valores médios de frequência e taxa de amortecimento considerados referência. Atribui-se a este fato a alteração da dominância ao estender os períodos de análise, do modo interárea de interesse para modos com frequências menores e mais bem amortecidos.

Os registros fasoriais do SPMS MedFasee BT foram empregados para o monitoramento de dois modos interárea do SIN: o modo Norte-Sul e o modo Acre/Rondônia-SIN. Para o modo Norte-Sul foram realizadas análises mono e multissinal, com grande aderência dos resultados. A análise multissinal resultou em redução do desvio-padrão das estimativas, fornecendo resultados menos dispersos. Para o período monitorado o modo apresentou valor médio de frequência de 0,349 Hz e de taxa de amortecimento em torno de 10 % (variando de acordo com a métrica de ordenação empregada). Além disso, para a análise multissinal foram calculadas as formas modais relacionadas aos sinais empregados. A oposição de fase entre as formas modais dos dois sinais empregados, de diferenças angulares considerando a mesma referência (USP_SC) mas com um terminal na área Norte (UFPE) e outro na área Sul (UFRGS), caracterizou a natureza interárea do modo identificado.

Para o monitoramento do modo Acre/Rondônia-SIN a métrica de ordenação de modos por meio do cálculo do IDM mostrou-se ineficiente (para o período considerado). Enquanto a ordenação por meio do cálculo da pseudo-energia mostrou a evolução dos valores de frequência e taxa de amortecimento ao longo do tempo, a ordenação por IDM teve pouca concordância com os resultados obtidos pelo método de Welch. Além disso, quando houve concordância no valor de frequência do modo

dominante, os valores de taxa de amortecimento estimados foram muito elevados, apontando natureza espúria do modo.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A principal sugestão para trabalhos futuros concentra-se no aperfeiçoamento e na integração de novas técnicas ao processo de ordenação dos modos de oscilação, e conseqüente determinação de dominância modal, para os resultados do método CCA. Um aperfeiçoamento possível para a utilização das técnicas atualmente implementadas (pseudo-energia e IDM) seria a determinação de limiares mínimos – dos valores de pseudo-energia e IDM – a partir dos quais as estimativas seriam consideradas válidas. Assim, quando os valores de pseudo-energia ou IDM estivessem abaixo desses limiares, as estimativas não seriam representadas graficamente. Com isso, a estimação de modos espúrios devido ao baixo nível de excitação de modos reais seria mitigada.

Nessa mesma linha, sugere-se a integração de técnicas de discriminação de modos reais de modos espúrios para a ordenação mais eficiente dos modos dominantes. Uma dessas técnicas é o diagrama de estabilização, que consiste na variação da ordem do modelo de representação para a realização das estimativas por métodos paramétricos. Pode-se então identificar como modos reais aqueles que se mantêm com frequência em uma certa vizinhança, já que os modos espúrios irão variar bastante à medida que a ordem do modelo é modificada.

Além de melhorias no processo de determinação de dominância modal, sugere-se a integração de metodologias próprias para análises de períodos de dados de grandes perturbações ao aplicativo de monitoramento. A ativação deste tipo de ferramenta seria feita a partir da detecção de perturbações de maior porte nos sinais analisados. Com isso, garantiria-se maior robustez ao aplicativo de monitoramento, mitigando problemas enfrentados pelas metodologias próprias para períodos de dados de ambiente frente à ocorrência de grandes perturbações.

REFERÊNCIAS

- [1] ROGERS, G. *Power System Oscillations*. 2nd. ed. Boston: Springer, 1999.
- [2] KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. 1st. ed. New York: McGraw-Hill Professional, 1994.
- [3] FOUAD, A. A. *Power System Control and Stability*. 2nd. ed. Piscataway, N.J: Wiley-IEEE Press, 2002.
- [4] 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, ago. 2004.
- [5] DOSIEK, L. A. *Estimating power system electromechanical modes and mode shapes using modern system identification techniques*. Tese (Ph.D.) — Univeristy of Wyoming, Laramie, WY, 2010.
- [6] WIES, R. W. *Estimating low-frequency electromechanical modes of power systems using ambient data*. Tese (Ph.D.) — Univeristy of Wyoming, Laramie, WY, 1999.
- [7] ANDERSON, M. G. *Application of parametric system identification to power system dynamic stability with statistical bounds*. Tese (Ph.D.) — Univeristy of Wyoming, Laramie, WY, 2004.
- [8] KOSTEREV, D. N.; TAYLOR, C.; MITTELSTADT, W. Model validation for the august 10, 1996 WSCC system outage. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 3, p. 967–979, ago. 1999.
- [9] IEEE PES Task Force on Modal Identification of Electromechanical Modes. Identification of Electromechanical Modes in Power Systems. jun. 2012. Disponível em: <<http://www.pes-store.org/p-13616.htm>>.
- [10] PRIOSTE, F.; SILVA, A. e; DECKER, I. Monitoring oscillations modes of the brazilian interconnected power system using ambient data. In: *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*. Trondheim: [s.n.], 2011. p. 1–7.

- [11] DECKER, I. et al. Monitoring of a large scale event in the brazilian power system by WAMS. In: *Bulk Power System Dynamics and Control - iREP Symposium*. Buzios, RJ: [s.n.], 2010. p. 1–8.
- [12] SANTOS, M. *Análise da dinâmica de sistemas elétricos de potência usando dados de medição fasorial sincronizada*. Tese (M.Eng.) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.
- [13] PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. 1st. ed. New York: Springer, 2008.
- [14] DECKER, I. et al. Performance of a synchronized phasor measurements system in the brazilian power system. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006*. [S.l.: s.n.], 2006.
- [15] DECKER, I. et al. System wide model validation of the brazilian interconnected power system. In: *2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–8.
- [16] ROGERS, G. Demystifying power system oscillations. *IEEE Computer Applications in Power*, v. 9, n. 3, p. 30–35, jul. 1996. ISSN 0895-0156.
- [17] TRUDNOWSKI, D.; PIERRE, J. Signal processing methods for estimating small-signal dynamic properties from measured responses. In: MESSINA, A. R. (Ed.). *Inter-area Oscillations in Power Systems*. 1. ed. New York, NY: Springer US, 2009, (Power Electronics and Power Systems). p. 1–36.
- [18] SARMADI, S. N.; VENKATASUBRAMANIAN, V. Electromechanical mode estimation using recursive adaptive stochastic subspace identification. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 29, n. 1, p. 349–358, jan. 2014.
- [19] TRUDNOWSKI, D. et al. Performance of three mode-meter block-processing algorithms for automated dynamic stability assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 23, n. 2, p. 680–690, maio 2008.
- [20] HAUER, J.; CRESAP, R. L. Measurement and modeling of pacific AC intertie response to random load switching. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100, n. 1, p. 353–359, jan. 1981.

- [21] LIU, G.; QUINTERO, J.; VENKATASUBRAMANIAN, V. Oscillation monitoring system based on wide area synchrophasors in power systems. In: *Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability - iREP Symposium*. Charleston, SC: [s.n.], 2007. p. 1–13.
- [22] OVERSCHEE, P. v. *Subspace Identification for Linear Systems: Theory - Implementation - Applications*. Softcover reprint of the original 1st ed. 1996 edition. Boston, MA: Springer, 2011.
- [23] PROAKIS, J. G. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*. 3rd edition. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1995.
- [24] PRONY, G. C. F. M. R. d. J. l'école polytech. *Essai expérimental et analytique sur les lois de la Dilatabilité des fluides élastiques et sur celles de la Force expansive de la vapeur de l'eau et la vapeur de l'alkool, à différentes températures*, v. 1, p. 24–76, 1795.
- [25] PIERRE, J.; TRUDNOWSKI, D.; DONNELLY, M. Initial results in electromechanical mode identification from ambient data. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 12, n. 3, p. 1245–1251, ago. 1997.
- [26] JEREMIAS, T. *Ambiente de Desenvolvimento de aplicativos para o Processamento de Sincrofasores*. Tese (M.Eng.) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.
- [27] WELCH, P. D. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, v. 15, n. 2, p. 70–73, jun. 1967. ISSN 0018-9278.
- [28] O'SHEA, P. A high-resolution spectral analysis algorithm for power-system disturbance monitoring. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 17, n. 3, p. 676–680, ago. 2002.
- [29] KANG, P.; LEDWICH, G. Estimating power system modal parameters using wavelets. In: *Proceedings of the Fifth International Symposium on Signal Processing and Its Applications, 1999. ISSPA '99*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 2, p. 563–566.
- [30] MESSINA, A.; VITTAL, V. Nonlinear, non-stationary analysis of interarea oscillations via hilbert spectral analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 3, p. 1234–1241, ago. 2006.

- [31] BURRUS, C. S.; GOPINATH, R. A.; GUO, H. *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer*. 1. ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 1997.
- [32] HAYKIN, S. S. *Adaptive Filter Theory*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [33] LIU, G. *Oscillation monitoring system based on wide area phasor measurements in power systems*. Tese (Ph.D.) — Washington State University, Pullman, WA, 2010.
- [34] ZHOU, N.; PIERRE, J. W.; WIES, R. W. Estimation of low-frequency electromechanical modes of power systems from ambient measurements using a subspace method. In: *Proceedings of the North American Power Symposium*. [S.l.: s.n.], 2003.
- [35] LARIMORE, W. Canonical variate analysis in identification, filtering, and adaptive control. In: *Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control, 1990*. [S.l.: s.n.], 1990. p. 596–604 vol.2.
- [36] ZHOU, N.; PIERRE, J.; HAUER, J. Initial results in power system identification from injected probing signals using a subspace method. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 3, p. 1296–1302, ago. 2006.
- [37] QIN, S. J. An overview of subspace identification. *Computers & Chemical Engineering*, v. 30, n. 10–12, p. 1502–1513, set. 2006.
- [38] OGATA, K. *Discrete-Time Control Systems*. 2 edition. ed. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1995.
- [39] KATAYAMA, T. *Subspace Methods for System Identification*. 2005 edition. ed. Berlin ; London: Springer, 2005.
- [40] JINGMIN, N.; CHEN, S.; FENG, L. Estimating the electromechanical oscillation characteristics of power system based on measured ambient data utilizing stochastic subspace method. In: *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–7.
- [41] AKAIKE, H. Markovian representation of stochastic processes by canonical variables. *SIAM Journal on Control*, v. 13, n. 1, p. 162–173, jan. 1975.

- [42] IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems. *IEEE Std C37.118.2-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)*, p. 1–53, dez. 2011.
- [43] SAADAT, H. *Power system Analysis*. 3rd. ed. United States: PSA Publishing, 2010.
- [44] VANFRETTI, L.; BENGTTSSON, S.; GJERDE, J. O. Preprocessing synchronized phasor measurement data for spectral analysis of electromechanical oscillations in the nordic grid. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, dez. 2013.
- [45] PRIOSTE, F. B. *Detecção e controle de oscilações eletromecânicas usando sistemas de medição fasorial sincronizada*. Tese (D.Eng.) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2011.
- [46] LYONS, R. G. *Understanding Digital Signal Processing*. 2 edition. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004.
- [47] LATHI, B. P. *Sinais e Sistemas Lineares*. [S.l.]: Bookman Companhia Ed, 2007. ISBN 9788560031139.
- [48] TRUDNOWSKI, D. et al. Performance of three mode-meter block-processing algorithms for automated dynamic stability assessment. In: . [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–1.
- [49] AGUIRRE, L. Quantitative measure of modal dominance for continuous systems. In: *Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Decision and Control, 1993*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 2405–2410 vol.3.
- [50] AGOSTINI, M. *Nova filosofia para o projeto de software para sistemas de energia elétrica usando modelagem orientada a objetos*. Tese (D.Eng.) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.
- [51] GAMMA, E. et al. *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. 1 edition. ed. Reading, Mass: Addison-Wesley Professional, 1994.
- [52] TROELSEN, A. *Pro C# 5.0 and the .NET 4.5 Framework*. 6th. ed. New York, NY: Apress, 2012.
- [53] BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. *UML: guia do usuário*. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2006.

- [54] PARK, S. K.; MILLER, K. W. Random number generators: Good ones are hard to find. *Commun. ACM*, v. 31, n. 10, p. 1192–1201, out. 1988.
- [55] BENETTI, M. et al. Avaliação e melhoria da segurança dinâmica de sistemas elétricos de potência utilizando sincrofasores. In: *XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - SEPOPE*. Foz do Iguaçu: [s.n.], 2014. p. 10.
- [56] LEANDRO, R. et al. Ambiente computacional de análise do desempenho dinâmico de sistemas elétricos usando sincrofasores. In: *XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia elétrica - SNPTEE*. Brasília, DF: [s.n.], 2013.
- [57] ZIMMER, V. et al. Análise do desempenho dinâmico do SIN durante grandes perturbações utilizando sincrofasores. In: *XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - SEPOPE*. Foz do Iguaçu, PR: [s.n.], 2014.
- [58] ONS. *Informativo ONS - Ano I, n. 7*. jan. 2010. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/newsletters/informativos/jan2010/07-materia01.html>>.