

**MOISES MACHADO SANTOS**

**ANÁLISE DA DINÂMICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE  
POTÊNCIA USANDO DADOS DE MEDIÇÃO FASORIAL  
SINCRONIZADA**

**FLORIANÓPOLIS - SC  
2008**

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

**ANÁLISE DA DINÂMICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE  
POTÊNCIA USANDO DADOS DE MEDIÇÃO FASORIAL  
SINCRONIZADA**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Moises Machado Santos**

Florianópolis, março de 2008.

# ANÁLISE DA DINÂMICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA USANDO DADOS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

Moises Machado Santos

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

---

Prof. Ildemar Cassana Decker, D. Sc.  
Orientador

---

Marcelo Neujahr Agostini, D. Eng.  
Co-Orientador

---

Prof<sup>a</sup>. Kátia Campos de Almeida, Ph.D.  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Prof. Ildemar Cassana Decker, D. Sc.

---

Marcelo Neujahr Agostini, D. Eng.

---

Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.

---

Prof. Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D.

---

Prof. Jorge Mário Campagnolo, D. Sc.

*Ao Deus Pai criador dos céus e da terra e de tudo que nela há.*

*Aos meus pais, Izaltemiro e Carmem, pelo inexorável amor a mim dedicado. Por fazer-me acreditar na família e no companheirismo.*

*Aos meus irmãos, Leco, Geovani, Daniel, Darlan e Luciano e ao meu tio Tadeu, pelo carinho, apoio e confiança irrestritos.*

*À minha noiva Silvana pelo amor sempre sincero e incontestável.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Professor Ildemar Cassana Decker e Marcelo Neujahr Agostini, cuja seriedade e brilhantismo acadêmico serviram-me de inspiração.

Aos membros da banca, professores Aguinaldo Silveira e Silva, Antônio José Alves Simões Costa e Jorge Mário Campagno, pelas valiosas contribuições.

Aos meus professores e colegas da PGEEL, em especial aos amigos André, Diego Brancher, Diego Issicaba, Fábio Brum, Fernando Prioste, Leonardo, Miguel Moreto, Waneska Patricia e Vitor L. de Matos, vocês mandaram bem!

Aos membros do projeto MedFasee, Alexandre Furstenberger, Daniel Dotta, Marcelo Benetti, Ricardo Lira, Tiago Chinvovski, pelo inestimável apoio.

Aos meus amigos Daniel Kuss, Diego Morais, Gelson Raugust, Luciano Malaquias, Marciano Pietczak, Joel Pavan e Luiz Alberto, que apesar da distância continuam me ensinando o valor da palavra amizade.

À Universidade Federal de Santa Catarina e particularmente ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica pela oportunidade de realizar este Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **ANÁLISE DA DINÂMICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA USANDO DADOS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA**

**Moises Machado Santos**

Março/2008

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

Co-Orientador: Marcelo Neujahr Agostini, D. Eng.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Palavras-chave: Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada, Oscilações Eletromecânicas, Métodos Paramétricos.

Número de Páginas: 95

O presente trabalho apresenta um estudo do estado da arte sobre Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS - *Synchronized Phasor Measurement System*), com ênfase em suas potenciais aplicações, e o desenvolvimento de metodologias para análise do comportamento dinâmico de Sistemas de Energia Elétrica (SEE), utilizando métodos paramétricos. A análise do estado da arte apresenta uma revisão teórica sobre as principais aplicações de SPMS, as quais foram categorizadas em: básicas; de monitoramento; de controle-proteção; e especiais. Destacam-se algumas experiências práticas, bem como uma síntese do estágio de desenvolvimento de tais aplicações, em diversos países. Descrevem-se ainda algumas experiências envolvendo a tecnologia de medição fasorial no Brasil. Em relação à análise da dinâmica de SEE, apresenta-se uma metodologia baseada no método de Prony e nos modelos Auto-Regressivo (AR) e Auto-Regressivo de Média Móvel (ARMA). Esta metodologia é utilizada para a identificação e a caracterização de oscilações eletromecânicas, em termos de frequência de oscilação, taxa de amortecimento, fatores de participação e *mode shapes*. São realizadas simulações e estudos de caso com dados reais do Sistema Interligado Nacional (SIN), baseado em registros de um protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada. Os resultados obtidos demonstram o grande potencial de SPMS, assim como o bom desempenho da metodologia implementada.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **DYNAMIC ANALYSIS OF POWER SYSTEMS USING SYNCHRONIZED PHASOR MEASUREMENTS**

**Moises Machado Santos**

March/2008

Advisor: Prof. Ildemar Cassana Decker, D. Sc.

Co-advisor: Marcelo Neujahr Agostini, D. Eng.

Area of Concentration: Electric Power Systems

Key words: Synchronized Phasor Measurement System, Electromechanical Oscillations, Parametric Methods

Number of Pages: 95

This dissertation presents a state-of-the-art study on Synchronized Phasor Measurement System (SPMS), focused on their potential applications as well as the development of methodologies for the analysis of the behavior of power systems dynamics, using parametric methods. It is presented a survey about the main applications of the Synchronized Phasor Measurement, categorized on basic applications, monitoring applications, protection and control applications, and special applications. In addition, it is described practical experiences and a synthesis of the state of the development of the SPMS applications worldwide. It is also presented several dynamic analysis based on the Prony's Method, the Autoregressive Model, and the Autoregressive Moving Average Model. These methodologies are used for the identification and characterization of electromechanical oscillations, in terms of frequency, damping rates, participation factors, and mode shapes. Several simulations and case studies had been revised with real data obtained from the Brazilian Electric System. The results demonstrated the great potential of the SPMS technologies for the improvement of power systems dynamics, as well as the effectiveness of the implemented methodologies.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Justificativa . . . . .	2
1.2	Definição e Delimitação do Problema . . . . .	3
1.3	Objetivo Geral . . . . .	3
1.3.1	Objetivos Específicos . . . . .	4
1.4	Estrutura do Texto . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada</b>	<b>5</b>
2.1	Estrutura de um SPMS . . . . .	6
2.1.1	Fonte de sincronização “GPS” . . . . .	6
2.1.2	Unidade de Medição Fasorial “PMU” . . . . .	7
2.1.3	Concentrador de Dados Fasoriais “PDC” . . . . .	8
2.1.4	Canais de Comunicação . . . . .	9
2.2	Aplicações de SPMSs . . . . .	9
2.2.1	Aplicações Básicas “AB” . . . . .	10
2.2.2	Aplicações de Monitoramento “AM” . . . . .	11
2.2.3	Aplicações de Controle e Proteção “ACP” . . . . .	15
2.2.4	Aplicações Especiais “AE” . . . . .	19
2.2.5	Síntese das Aplicações de SPMSs . . . . .	21
2.3	Experiências no Brasil . . . . .	23
2.3.1	Projeto ONS . . . . .	24
2.3.2	Projeto MedFasee . . . . .	24
2.4	Considerações Finais . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Análise da Dinâmica de SEE via Modelos Paramétricos</b>	<b>26</b>
3.1	O Método de Prony . . . . .	27
3.1.1	Descrição Matemática . . . . .	27
3.1.2	Erro do modelo de predição linear . . . . .	31
3.1.3	Avaliação do Método de Prony . . . . .	32

3.2	Modelos Auto-Regressivo e Auto-Regressivo de Média Móvel . . . . .	32
3.2.1	Estimação dos parâmetros do modelo Auto-Regressivo . . . . .	36
3.2.2	Método da Autocorrelação . . . . .	37
3.2.3	Seleção da Ordem do Modelo do Auto-Regressivo . . . . .	40
3.2.4	Estimação dos parâmetros do Modelo Auto-Regressivo de Média Móvel . . . . .	42
3.2.5	Seleção da Ordem do Modelo do Auto-Regressivo de Média Móvel	43
3.3	Metodologia Proposta . . . . .	44
3.3.1	Estimação de fatores de participação e <i>mode shapes</i> via método de Prony . . . . .	45
3.4	Conclusões . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Experimentos Computacionais</b>	<b>54</b>
4.1	Estudos de simulação . . . . .	54
4.1.1	Sistema Equivalente Brasileiro Sul Sudeste Modificado . . . . .	56
4.1.2	Sistema New England . . . . .	65
4.2	Estudos de Caso . . . . .	73
4.2.1	Desligamento da U.G. 7 da usina Jorge Lacerda C . . . . .	74
4.2.2	Desligamento da Interligação Norte-Sul . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>81</b>
5.1	Principais Contribuições . . . . .	83
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	84
<b>A</b>	<b>Dados dos Sistemas Teste</b>	<b>85</b>
A.1	Dados do Sistema Equivalente Sul-Sudeste . . . . .	85
A.1.1	Dados de barra - Sistema Equivalente Sul-Sudeste . . . . .	85
A.1.2	Dados de linha - Sistema Equivalente Sul-Sudeste . . . . .	85
A.1.3	Dados dos geradores síncronos - Sistema Equivalente Sul-Sudeste	86
A.2	Dados do Sistema New England . . . . .	87
A.2.1	Dados de barra . . . . .	87
A.2.2	Dados de linha . . . . .	88
A.2.3	Dados dos geradores síncronos . . . . .	89
A.2.4	Dados dos reguladores de velocidade . . . . .	89

# Lista de Figuras

2.1	Estrutura básica de um SPMS. . . . .	6
2.2	Estrutura básica da PMU. . . . .	7
2.3	Funções básicas do PDC. . . . .	8
2.4	Classificação das aplicações de SPMSs. . . . .	9
2.5	Resumo dos métodos de análise espectral aplicados em SPMSs. . . . .	11
2.6	Decréscimo das margens de segurança com incremento de capacitância <i>shunt</i> (adaptado de Niglye et al. (2005)). . . . .	13
2.7	Curva P-Q de um gerador (adaptado de Xie et al. (2006)). . . . .	14
2.8	Aplicações de SPMSs em diversos países. . . . .	21
3.1	Fluxograma do método de Prony. . . . .	31
3.2	Modelo paramétrico ARMA (adaptado de Marple (1987)). . . . .	33
3.3	Modelo paramétrico ARMAX (adaptado de Marple (1987)). . . . .	34
3.4	Modelo paramétrico MA (adaptado de Marple (1987)). . . . .	35
3.5	Modelo paramétrico AR (adaptado de Marple (1987)). . . . .	36
3.6	Fluxograma - modelo Auto-Regressivo. . . . .	37
3.7	Fluxograma - Modelo Auto-Regressivo de Média Móvel. . . . .	43
3.8	Fluxograma para análise da dinâmica de SEE via métodos paramétricos. . . . .	44
3.9	Resposta do sistema ao impulso. . . . .	49
3.10	Comparação dos autovetores à direita e coeficiente $h_i$ . . . . .	51
3.11	Fatores de participação por barras de geração. . . . .	52
3.12	<i>Mode shapes</i> - exemplo numérico. . . . .	53
4.1	Configuração do Sistema Equivalente Brasileiro Sul Sudeste Modificado. . . . .	56
4.2	Desvio de frequência pós-distúrbio. . . . .	57
4.3	Modos de oscilação do sistema equivalente - <i>software</i> PacDyn. . . . .	57
4.4	Fatores de contribuição do sistema equivalente. . . . .	59
4.5	Fatores de participação (modo $-0,4187 \pm 2,7653i$ ) - PacDyn. . . . .	60
4.6	Fatores de participação ( modo $-1,2108 \pm 12,313i$ ) - PacDyn. . . . .	60
4.7	Fatores de participação (modo $-1,7675 \pm 13,905i$ ) - PacDyn. . . . .	61

4.8	Fatores de participação (modo $-1, 8499 \pm 13, 873i$ ) - PacDyn. . . . .	61
4.9	<i>Mode shapes</i> associados ao modo $-1, 2108 \pm 12, 313i$ . . . . .	62
4.10	<i>Mode shapes</i> associados ao modo $-1, 7675 \pm 13, 905i$ . . . . .	63
4.11	<i>Mode shapes</i> associados ao modo $-1, 8499 \pm 13, 873i$ . . . . .	63
4.12	<i>Mode shapes</i> associados ao modo $-0, 41871 \pm 2, 7653i$ . . . . .	64
4.13	Sistema New England. . . . .	65
4.14	Resposta do sistema New England. . . . .	66
4.15	Modos de oscilação - <i>software</i> PacDyn. . . . .	66
4.16	Fatores de contribuição no sistema New England. . . . .	68
4.17	Fatores de participação (modo $-0, 0796 \pm 2, 3077i$ ) - PacDyn. . . . .	69
4.18	Fatores de participação (modo $-0, 3778 \pm 8, 069i$ ) - PacDyn. . . . .	69
4.19	Fatores de participação (modo $-0, 2816 \pm 7, 5363i$ ) - PacDyn. . . . .	70
4.20	Fatores de participação (modo $-0, 2816 \pm 6, 3122i$ ) - PacDyn. . . . .	70
4.21	<i>Mode shapes</i> associados ao modo $-0, 0796 \pm 2, 3077i$ . . . . .	71
4.22	<i>Mode shapes</i> associados ao modo $-0, 2817 \pm 7, 5363i$ . . . . .	71
4.23	<i>Mode shapes</i> associados ao modo $-0, 3778 \pm 8, 069i$ . . . . .	72
4.24	<i>Mode shapes</i> associados ao modo $-0, 2816 \pm 6, 3122i$ . . . . .	72
4.25	Tela de monitoração em tempo real. . . . .	73
4.26	Frequência da tensão no SIN. . . . .	74
4.27	Oscilações eletromecânicas - Desligamento da U.G. 7 da usina Jorge Lacerda C. . . . .	75
4.28	<i>Mode shapes</i> associados à U.G. 7 de Jorge Lacerda C . . . . .	76
4.29	Frequência da tensão no SIN. . . . .	78
4.30	Oscilações eletromecânicas - religamento da interligação Norte-Sul. . . . .	78
4.31	Principais modos inter-área do SIN (Fonte: ONS, 2007). . . . .	79
4.32	<i>Mode shapes</i> - desligamento da interligação Norte-Sul. . . . .	80

# Lista de Tabelas

2.1	Registro de faltas permanentes em um sistema de 500kV. . . . .	18
2.2	PMUs em estações de geração conectadas à BPAT. . . . .	21
2.3	Resumo: Aplicações de SPMSs . . . . .	22
3.1	Modos de oscilação barra 1. . . . .	50
4.1	Estimativa do modo de oscilação dominante sem ruído. . . . .	58
4.2	Estimativa do modo de oscilação dominante com SNR de 39dB. . . . .	58
4.3	Estimativa do modo de oscilação dominante sem ruído. . . . .	67
4.4	Estimativa do modo de oscilação dominante com SNR de 39dB. . . . .	67
4.5	Estimativa dos modo de oscilação associados à U.G. 7 de Jorge Lacerda C. . . . .	75
4.6	Estimativa do modo de oscilação associado ao religamento da interligação Norte-Sul. . . . .	79
A.1	Dados de barra - Sistema Equivalente Sul-Sudeste. . . . .	85
A.2	Dados de linha - Sistema Equivalente Sul-Sudeste. . . . .	86
A.3	Dados dos geradores síncronos - Sistema Equivalente Sul-Sudeste. . . . .	86
A.4	Dados de barra - Sistema New England. . . . .	87
A.5	Dados de linha - Sistema New England. . . . .	88
A.6	Dados dos geradores síncronos - Sistema New England. . . . .	89
A.7	Dados dos reguladores de velocidade - Sistema New England. . . . .	89

# Lista de Siglas

AIC - Akaike Information Criterion  
AR - Autoregressive  
ATR - Acceleration Trend Relay  
ARMA - Autoregressive Moving Average  
BPA - Bonneville Power Administration  
BPAT - Bonneville Power Administration Transmission  
CSE - Sevillana da Electricidad  
CPU - Central Processing Unit  
CAT - Criterion Autoregressive Transfer Function  
DFT - Discrete Fourier Transform  
DT - Decision Tree  
FACTS - Flexible AC Transmission System  
FFT - Fast Fourier Transform  
FPE - Final Prediction Error  
GPS - Global Positioning System  
IEEE - Institute of Electric and Electronics Engineers  
IP - Internet Protocol  
KEPCO - Korea Electric Power Co.  
LAN - Local Area Network  
LIPA - Long Island Power Authority  
MA - Moving Average  
ONS - Operador Nacional do Sistema  
PLC - Power Line Communications  
PDC - Phasor Data Concentrator  
PMU - Phasor Measurement Unit  
PPS - Pulso Por Segundo  
PSS - Power System Stabilizer  
RDP - Registrador Digital de Perturbações

SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition  
SCE - Southern California Edison  
SEE - Sistemas de Energia Elétrica  
SPMS - Synchronized Phasor Measurement System  
SGCC - State Grid Corporation of China  
SNR - Signal Noise Ratio  
SVD - Singular Value Decomposition  
TCP - Transmission Control Protocol  
TSA - Transient Stability Assessment  
UFLS - Under Frequency Load Shedding  
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina  
WAMS - Wide Area Measurement System  
WECC - Western Electric Coordinating Council  
WSCC - Western Systems Coordinating Council

# Capítulo 1

## Introdução

Nas últimas décadas, a indústria de energia elétrica vem sofrendo profundas mudanças estruturais. Estas mudanças compreendem basicamente o processo de desregulamentação do setor elétrico e o desenvolvimento de um ambiente de mercado, baseado na concepção de que é possível tratar a energia elétrica como uma *commodity* e separá-la comercialmente dos serviços de transporte, ou seja, a transmissão e a distribuição (FALCÃO, 2007).

De acordo Falcão (2007), as principais motivações para o processo de reestruturação do setor elétrico foram: atrair capitais privados e liberar o Estado de grandes investimentos necessários à expansão do setor; aumentar a competição; e conduzir à utilização mais eficiente dos recursos energéticos.

Esta mudança de paradigma tem trazido grandes desafios ao planejamento da expansão e da operação elétrica e energética do sistema. O modelo desregulamentado pressupõe um número expressivo de agentes envolvidos, bem como o livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição. Estes fatores aumentam as incertezas envolvidas na operação do sistema, tornando-a mais complexa. Além disso, demandas naturais de um ambiente de mercado competitivo, associadas às restrições de expansão, geram uma tendência natural em operar o sistema elétrico cada vez mais próximo aos seus limites operacionais, potencializando a ocorrência de blecautes.

Diante desses desafios, diversas alternativas têm sido propostas visando à melhoria dos atuais sistemas de supervisão, controle e proteção. Dentre essas propostas, destacam-se aquelas relacionadas à tecnologia de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS - *Synchronized Phasor Measurement System*). As principais contribuições destes sistemas são: alta precisão, elevada taxa de amostragem e sincronização de medidas fasoriais (PHADKE, 2005). Estas características tornam o SPMS capaz de monitorar fenômenos dinâmicos em Sistemas de Energia Elétrica (SEE) o que, até o momento, não é possível com os sistemas convencionais de supervisão e controle

(SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*).

As primeiras experiências envolvendo a medição fasorial sincronizada iniciaram em 1989, através do projeto *Wide Area Measurement System* (WAMS), abrangendo os subsistemas do oeste dos Estados Unidos (WECC - *Western Electric Coordinating Council*), mais especificamente as empresas *Southern California Edison* (SCE) e *Bonneville Power Administration* (BPA) (DECKER et al., 2004). Atualmente, essa tecnologia se encontra em crescente desenvolvimento em diversos países, tais como China, Japão, Canadá, Croácia e Itália, entre outros (CIGRÉ, 2007).

## 1.1 Justificativa

O foco principal dos estudos envolvendo os SPMS tem sido explorar suas potenciais aplicações, visando à segurança operacional, assim como a otimização no uso de recursos energéticos e estruturais dos SEE. Uma dessas aplicações em especial, refere-se ao monitoramento de oscilações de baixa frequência (eletromecânicas).

As oscilações eletromecânicas são uma consequência de interações dinâmicas entre geradores síncronos quando o sistema é submetido a um distúrbio. Essas oscilações tendem a se manifestar, predominantemente, em linhas de transmissão (LTs) de longas distâncias, operando em condições de elevado carregamento. As oscilações eletromecânicas podem ser classificadas por faixas de frequência (SILVA; COSTA, 2006):

- **modo de oscilação inter-área** - está associado a oscilações entre conjuntos de máquinas de diferentes áreas da rede elétrica. Como grandes massas estão envolvidas as frequências são baixas, na faixa de 0,2 a 0,5Hz.
- **modo de oscilação local** - corresponde a uma planta oscilando em relação ao conjunto das demais plantas da mesma área da rede elétrica. As frequências envolvidas estão na faixa de 1 a 2 Hz.
- **modo de oscilação intra-planta** - relacionado às oscilações entre as unidades de uma mesma usina. Normalmente, esses modos são bem amortecidos. Como massas reduzidas estão envolvidas, a faixa de frequência situa-se entre 2 a 2,5 Hz.

Essas oscilações, se não forem devidamente amortecidas, podem provocar danos a equipamentos; limitar a transferência de potência entre barras; provocar a atuação da proteção e a abertura de LTs; e, em alguns casos, levar o sistema a um comportamento instável (SILVA; COSTA, 2006).

O primeiro passo para a solução efetiva desses problemas parte da identificação das características relacionadas às oscilações de potência, tais como: frequência de

oscilação, taxa de amortecimento e fatores de participação de geradores (XIAO et al., 2004). Tais informações contribuem para avaliar a segurança do sistema, determinar limites de transferência e fornecer subsídios para implementação de sistemas de controle de amortecimento como, por exemplo, estabilizadores de sistemas de potência (PSS - *Power Systems Stabilizers*).

## 1.2 Definição e Delimitação do Problema

O uso de técnicas baseadas em análise linear com parâmetros invariantes no tempo é uma prática comum nos estudos de oscilações eletromecânicas. Consiste basicamente em determinar a matriz de espaço de estados do sistema e aplicar, adequadamente, a análise de autovalores. No entanto, o uso dessas ferramentas para aplicações em tempo real é limitado por alguns aspectos práticos, tais como (XIAO et al., 2004):

- a representação de SEE típicos através de matrizes de espaço de estados de grande porte, o que requer grande esforço computacional;
- o emprego de modelos lineares;
- comportamento não estacionário do sistema.

A precisão desses métodos pode ficar comprometida em virtude do comportamento não estacionário do sistema (parâmetros variantes no tempo), decorrente da abertura de LTs, do desligamento de geradores e de ações de controle, provenientes de distúrbios e das características naturais de operação do sistema (PERUYERO; ROMÁN, 2006).

Com o desenvolvimento dos SPMSs, uma das alternativas que têm sido propostas para transpor as limitações impostas pelos métodos de análise linear é a utilização de métodos paramétricos, pois não requerem a linearização e a associação a matrizes de grande porte do sistema (GASCA; CHOW, 1999). Atualmente, destacam-se os métodos de Prony e o modelo ARMA (*Autoregressive Moving Average*) (XIAO et al., 2004; WIES; PIERRE; TRUDNOWSKI, 2003). Entretanto, ainda não há consenso em termos do método mais indicado para esse tipo de estudo.

## 1.3 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como principal objetivo estudar o comportamento dinâmico de Sistemas Elétricos de Potência, através do monitoramento de oscilações de baixa frequência, utilizando dados de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada.

### 1.3.1 Objetivos Específicos

No desenvolvimento do trabalho foram realizadas investigações e contribuições relacionadas aos seguintes temas:

- análise e documentação do estado da arte acerca das aplicações da medição fasorial sincronizada;
- estudo e implementação de metodologias de identificação paramétricas, baseadas no método de Prony e nos modelos Auto-Regressivo e Auto-Regressivo de Média Móvel, para a análise de oscilações de baixa frequência, a partir do monitoramento em tempo real;
- Desenvolvimento de metodologias para obtenção de fatores de participação e *mode shapes*.

## 1.4 Estrutura do Texto

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

No capítulo 2, consta a descrição sobre os SPMS e sua estrutura básica, seguida de um estudo sobre as aplicações da medição fasorial, dando ênfase às aplicações de monitoramento, controle e proteção.

O capítulo 3 é dedicado ao estudo dos métodos paramétricos, mais especificamente, ao método de Prony e aos modelos Auto-Regressivo e Auto-Regressivo de Média Móvel. Apresenta-se a formulação matemática, critérios de identificação de ordem e uma breve análise sobre esses métodos. Além disso é apresentada uma abordagem para a obtenção de fatores de participação por barras de geração e *mode shapes*, bem como a metodologia adotada para realizar a análise do comportamento dinâmico de SEE, a partir de dados de medição fasorial sincronizada.

No capítulo 4, são apresentados os resultados experimentais em duas etapas: Simulações e Estudos de Caso. Nos estudos de simulação, apresenta-se os resultados da análise do desempenho dos métodos implementados e os efeitos de ruídos sobre os parâmetros estimados. Nos estudos de casos, são apresentados alguns resultados envolvendo distúrbios ocorridos no Sistema Interligado Nacional (SIN), os quais foram registrados por um sistema de medição fasorial sincronizada, instalado em três capitais da região sul do país.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, bem como as principais contribuições e algumas sugestões para futuros desenvolvimentos.

## Capítulo 2

# Os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada

Os estudos envolvendo os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada iniciaram em meados da década de 80, no âmbito da universidade Virginia Tech, nos Estados Unidos. Em 1988, com o apoio financeiro do *US Department of Energy*, *US Electric Power Research Institute* e *US National Science Foundation*, foi desenvolvido o primeiro protótipo de Unidade de Medição Fasorial (PMU - *Phasor Measurement Unit*) que, em seguida, passou a ser fabricada comercialmente pela empresa Macrodyne, a qual desenvolveu também o concentrador de dados, para coleta dos dados das PMU. As três primeiras companhias a instalarem PMUs em seus sistemas foram a *Bonneville Power Administration* (BPA), *American Electric Power* (AEP) e a *New York Power Authority* (PHADKE, 2005).

A partir desse marco tecnológico, associado à concepção da primeira PMU, vários avanços ocorreram no desenvolvimento dos SPMSs. Especialmente, com o surgimento do projeto *Wide Area Measurement System* (WAMS) nos Estados Unidos, o qual serviu de estímulo a diversos países a iniciarem suas pesquisas envolvendo a medição fasorial sincronizada. Atualmente, os esforços principais nas pesquisas sobre a medição fasorial sincronizada têm sido no intuito de explorar as aplicações de SPMSs, visando à melhoria dos atuais sistemas de supervisão, controle e proteção de Sistemas de Energia Elétrica.

O objetivo do presente capítulo é investigar as potenciais aplicações da medição fasorial sincronizada. Inicialmente, apresenta-se uma revisão teórica sobre as definições, características e propriedades dos SPMSs. Em seguida, apresentam-se as principais aplicações de SPMSs citadas na literatura, que foram divididas, no estudo, em: básicas; de monitoramento; de controle-proteção; e especiais. Finalizando, apresenta-se uma síntese do estágio de desenvolvimento dessas aplicações, bem como algumas experiências envolvendo a tecnologia de medição fasorial no Brasil.

## 2.1 Estrutura de um SPMS

O SPMS pode ser compreendido como um sistema de medição de grandezas elétricas, em instalações distantes geograficamente, onde as medidas são sincronizadas no tempo e disponibilizadas na forma de fasores (DECKER et al., 2006b).

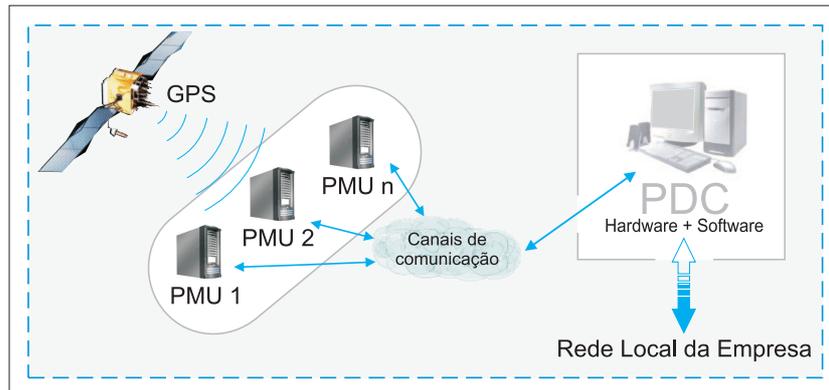


Figura 2.1: Estrutura básica de um SPMS.

A Figura 2.1 ilustra a estrutura básica de um SPMS constituída por: Unidade de Medição Fasorial (PMU - *Phasor Measurement Unit*), Concentrador de Dados Fasoriais (PDC - *Phasor Data Concentrator*) e canais de comunicação.

### 2.1.1 Fonte de sincronização “GPS”

O Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning System*) é responsável pela sincronização das medidas fasoriais. Atualmente, este sistema é composto por 24 satélites, com um tempo de órbita de 12 horas, o que torna possível a visualização de 5 a 8 unidades de qualquer lugar da terra e a qualquer tempo. O sistema GPS fornece sinais de posição geográfica, com precisão horizontal de 3 a 15 metros e vertical de 27,7 metros e sinais de tempo (PPS - Pulso Por Segundo), cuja precisão é da ordem de aproximadamente 100 nanosegundos (PHADKE, 1993). Além do GPS existem outros sistemas, dos quais destacam-se o sistema russo, chamado de GLONASS, em operação e a expectativa, a partir de 2008, da operação sistema do europeu, chamado GALILEU (BOLFE; VASCO, 2005).

Os sinais de tempo (PPS) enviados pelo GPS, são os responsáveis pela viabilização da tecnologia de medição fasorial sincronizada de ampla abrangência, pois fornecem a referência temporal necessária para realizar a sincronização das medições. Com os sinais dos pulsos de sincronização com precisão de 1 microsegundo, tem-se um erro de  $0,021^\circ$  em SEE com frequência de 60Hz, o que representa uma adequada precisão para medições de frequência, tensão e corrente (PHADKE, 2005).

### 2.1.2 Unidade de Medição Fasorial “PMU”

Essencialmente, a Unidade de Medição Fasorial é um dispositivo de medição de tensões e de correntes alternadas, com uma referência temporal comum, obtida através de sinais via satélite (GPS). As medidas de tensão e de corrente são processadas pela PMU e convertidas em fasores e, então, enviadas ao concentrador de dados a taxas que variam de 10 a 60 sincrofasores por segundo (KARLSSON; HEMMINGSSON; LINDAHL, 2004).

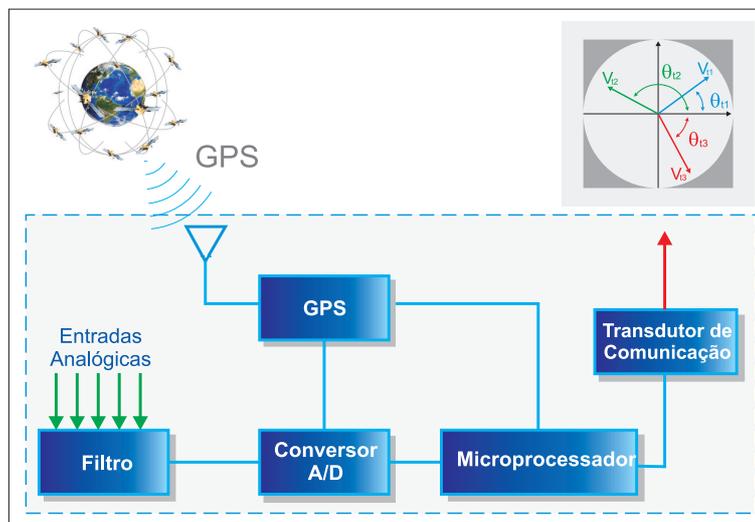


Figura 2.2: Estrutura básica da PMU.

A Figura 2.2 representa a estrutura típica de uma PMU. O processo para a obtenção das medidas fasoriais inicia na etapa de filtragem, visando evitar efeitos de *aliasing*<sup>1</sup>. Na etapa posterior, os sinais de entrada de tensão e corrente são discretizados utilizando-se conversores do tipo analógico-digital. A referência temporal de amostragem é dada através do receptor de sinais GPS, que recebe os sinais do tipo pulsos por segundo (PPS) que, em conjunto com o oscilador do tipo “*Phase-Locked*”, fornece os instantes de amostragem (PHADKE, 1993).

A etapa subsequente refere-se ao tratamento matemático das amostras, através do microprocessador. Utiliza-se a Transformada Discreta de Fourier (*DFT - Discrete Fourier Transform*), na sua forma recursiva, para converter as amostras de tensão e corrente em fasores (EHRENSPERGER, 2002).

<sup>1</sup>aliasing: criação de uma falsa frequência durante o processo de amostragem, devido à baixa taxa de amostragem. Para se evitar esse efeito, a taxa de amostragem, chamada de taxa de Nyquist, deve ser maior do que o dobro da maior componente de frequência que se deseja medir.

### 2.1.3 Concentrador de Dados Fasoriais “PDC”

O Concentrador de Dados Fasoriais, conforme a Figura 2.3, tem a finalidade de: adquirir os fasores enviados pelas PMUs; verificar eventuais erros de transmissão; e organizar e disponibilizar os dados para outras aplicações.

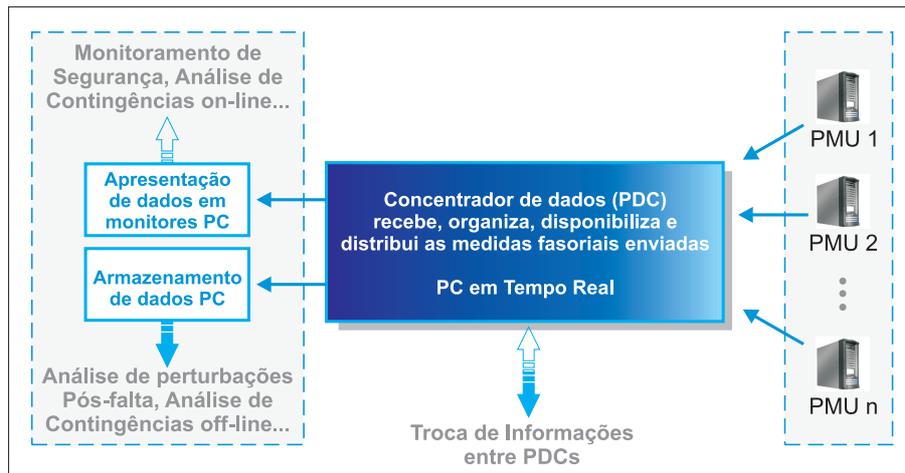


Figura 2.3: Funções básicas do PDC.

Conforme Xie et al. (2006), as principais características que um PDC deve ter para garantir um bom desempenho do SPMS são:

- **Simultaneidade:** adquirir, processar e disponibilizar os dados fasoriais simultaneamente.
- **Robustez:** suportar falhas de *hardware* e de *software*, armazenar de forma segura os dados fasoriais e, ainda, suportar falhas nos canais de comunicação sem perdas de dados.
- **Expansibilidade:** suportar o aumento do processamento de dados, devido ao aumento de PMUs.
- **Rapidez:** manter o equilíbrio entre o tempo de acesso e a capacidade de armazenamento.

Atualmente, o formato dos dados transferidos entre PMUs e PDC é baseado no protocolo IEEE<sup>2</sup> C37.118, aprovado em 2005, em substituição ao IEEE - 1344, que era utilizado como padrão de PMU, desde o seu desenvolvimento.

<sup>2</sup>IEEE - Institute of Electric and Electronics Engineers

### 2.1.4 Canais de Comunicação

Os canais de comunicação têm o objetivo bem definido de viabilizar a transferência de dados entre a PMU e o PDC ou, ainda, a troca de informações entre diferentes PDCs.

Os sistemas de comunicação convencionais são ainda muito utilizados em SPMSs, como as linhas telefônicas ou aquelas que utilizam LTs de potência (PLC - *Power Line Communication*) (NADUVATHUPARAMBIL; VALENTI; FELIACHI, 2002). Entretanto, estes sistemas de comunicação estão sendo substituídos por tecnologias mais recentes, baseadas em fibra ótica e sistemas sem fio (*Wireless*).

O atraso de transferência de dados (*Delay Communication*) é um dos principais aspectos que diferencia os diversos sistemas de comunicação. Esses atrasos têm impacto direto no desempenho de um SPMS, principalmente para as aplicações de controle em tempo real. A escolha do sistema de comunicação a ser utilizada em SPMSs depende da aplicação de interesse, geralmente aplicações de controle e proteção requerem uma maior rapidez de comunicação em relação às demais.

## 2.2 Aplicações de SPMSs

Conforme já comentado, os estudos envolvendo as aplicações de SPMSs têm despertado grande interesse, principalmente no que se refere ao monitoramento e controle de SEE. A seguir apresentam-se algumas das potenciais aplicações de SPMSs encontradas na literatura, bem como experiências envolvendo seu uso. Estas aplicações estão organizadas em quatro categorias, conforme ilustrado na Figura 2.4.

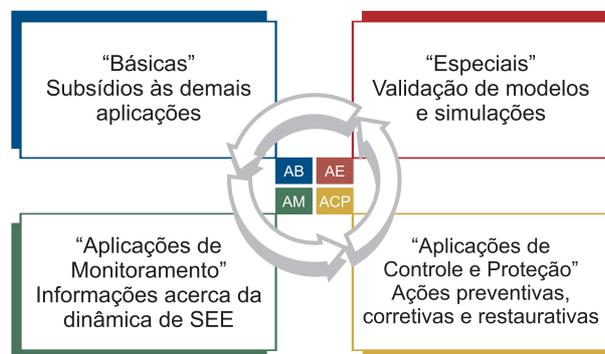


Figura 2.4: Classificação das aplicações de SPMSs.

Esta organização é resultante da análise do estado da arte. A denominação da categoria “Aplicações Básicas”, bem como as denominações das aplicações listadas nesta categoria, segue a descrição realizada em Xie et al. (2006).

### 2.2.1 Aplicações Básicas “AB”

As aplicações básicas de um SPMS compreendem a estrutura para o desenvolvimento das demais aplicações da medição fasorial, constituídas pela Plataforma Integrada de Dados Fasoriais (AB1), Monitoramento e Visualização da Dinâmica em tempo real (AB2) e Registro e Reprodução de Eventos (AB3).

A Plataforma Integrada de Dados Fasoriais tem a função de um PDC central, ou seja, aquistar e gerenciar os dados fasoriais enviados de forma contínua pelas PMUs e outras estações centrais (PDCs) de menor nível hierárquico. Além dessas funções, ela deve disponibilizar uma interface amigável para facilitar a aplicabilidade das demais funções, especialmente as que requerem dados do comportamento global da dinâmica do sistema.

A aplicação de Monitoramento e Visualização da Dinâmica em tempo real, consiste em fornecer ferramentas básicas de visualização do comportamento dinâmico do sistema. Neste trabalho, tais ferramentas foram divididas em três grupos, conforme proposto inicialmente em Xie et al. (2006):

- **Gráficos analíticos:** visualização do comportamento do sistema através de gráficos, com base no tempo, frequência e coordenadas polares;
- **Tabelas estatísticas:** análise estatística do comportamento do sistema, como por exemplo, o uso de funções de distribuição de probabilidade;
- **Alarme e proteção:** verificação automática de violações de restrições operacionais e sinalização de condições inseguras de operação.

A combinação dessas ferramentas pode originar um quarto grupo de ferramentas de visualização e análise denominado, na literatura, como “*mixed*”.

O Registro e a Reprodução de Eventos baseados em SPMSs, como o nome sugere, tem o objetivo de registrar o comportamento do sistema quando submetido a uma perturbação e disponibilizar dados para análises pós-distúrbios (*off-line*). Tal função é semelhante aos tradicionais registradores digitais de distúrbio (RDP - Registrador Digital de Perturbações). Entretanto, as medições realizadas pelas PMUs ao longo do sistema são sincronizadas e podem ser facilmente centralizadas, para reconstruir a visão global do evento. Conseqüentemente, é possível realizar uma análise mais apurada das causas de distúrbios. Essa função pode também ser combinada a outras, tais como análise de oscilações de baixa frequência, identificação de parâmetros e validação de simulações, que compõem o grupo de Aplicações Especiais (AE) e de Monitoramento (AM), discutidas a seguir.

## 2.2.2 Aplicações de Monitoramento “AM”

O conjunto das aplicações de Monitoramento visa fornecer informações que permitam avaliar a segurança operacional do sistema em tempo real. Compõem essa categoria a Análise de Oscilações de Baixa Freqüência em tempo real (AM1), Estimação de Estados Híbrida (AM2), Monitoramento de Estabilidade de Tensão (AM3) e Monitoramento do Estado de Operação de Geradores (AM4).

### Análise de Oscilações de Baixa Freqüência em tempo real “AM-1”

A Análise de Oscilações de Baixa Freqüência em tempo real tem o objetivo de identificar e caracterizar oscilações eletromecânicas em SEE. Para realizar tal tarefa, a primeira etapa é a detecção das oscilações, onde são utilizados índices de sensibilidade da dinâmica do sistema, como variações de fluxos de potência e ângulos em interligações. Na segunda etapa, quando é diagnosticada a presença de oscilações, são utilizadas ferramentas de análise espectral para obter informações sobre os modos dominantes de oscilação e caracterizá-los em termos de freqüência de oscilação e taxa de amortecimento. Na Figura 2.5, são apresentados alguns métodos citados na literatura para estudo de oscilações eletromecânicas, a partir de dados de medição fasorial.

	F.F.T	Prony	Transformada Hilbert	Filtros Digitais	Transformada Wavelet
EUA	■				■
China		■			
Brasil	■				
México			■		
Japão				■	
Rússia					■

Figura 2.5: Resumo dos métodos de análise espectral aplicados em SPMSs.

Observou-se que Análise de Oscilações de Baixa Freqüência, vem sendo explorada em diversos países, como os Estados Unidos, China, Japão, México e Brasil. Notou-se, no entanto, que cada país utiliza um método de análise distinto, ou seja, não há consenso formado sobre qual é o mais apropriado para ser utilizado em tal aplicação.

### Estimação de Estados Híbrida “AM-2”

O processo de estimação de estados tem um papel fundamental na análise da segurança de SEE. O estimador de estados é parte integrante dos sistemas de controle

supervisório (SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*) e tem a finalidade de fornecer informações precisas sobre o estado atual de operação do sistema. Para isso, são utilizadas telemedidas redundantes (obtidas através de Unidades Terminais Remotas - UTRs) de tensões e injeções de potência nas barras, fluxos de potência ativa e reativa nas linhas, bem como os *status* de disjuntores e chaves. Estas medidas são utilizadas para estimar as tensões complexas em todas as barras do sistema, denominadas como Estado do Sistema em Regime Permanente. Tais informações permitem se determinarem os fluxos e injeções de potência em linhas e barras, assim como outras grandezas elétricas necessárias para o monitoramento e avaliação da segurança do sistema (COSTA; SALGADO, 2002).

Com o surgimento dos SPMSs a idéia inicial era de que os sistemas atuais de estimação de estados fossem abolidos, sob a alegação de que o processo de estimação, utilizando medidas do próprio estado do sistema, seria mais vantajoso do que estimá-lo a partir de outras medidas, usando equações não-lineares (ZHOU et al., 2006). Embora a idéia fosse atraente, seria necessária a instalação de PMUs em quase todas as barras do sistema, o que ainda não se verifica viável economicamente.

Em virtude desta restrição financeira, a alternativa que vem sendo proposta é a incorporação de medidas fasoriais ao processo convencional de estimação, denominada na literatura como Estimação de Estados Híbrida. Quando medidas fasoriais são incorporadas adequadamente às medidas convencionais, o processo de estimação de estados pode melhorar significativamente, em termos de observabilidade, identificação de medidas portadoras de erros grosseiros e, conseqüentemente, há melhora na precisão da estimação de estados (PHADKE; THORP; KARINI, 2006).

Na Espanha, a empresa Sevillana de Electricidad (CSE), em parceria com a empresa Siemens, adequou o seu sistema SCADA para incorporar medidas fasoriais. Após vários testes de robustez, precisão e confiabilidade, a empresa teve seu estimador de estados adaptado para processar medidas fasoriais, o qual se encontra em operação atualmente (MARTINEZ; PARASHAR; DYER, 2004).

Outras linhas de pesquisa envolvendo essa aplicação, em países como Estados Unidos, China e Suíça, visam a alocação ótima de PMUs para estimação de estados, bem como novas formas de incluir as medidas fasoriais no processo de estimação de estados, que requeiram mínimas mudanças possíveis nos sistemas SCADA e nos algoritmos de estimação (ZHAO, 2006; ZEXIANG, 2005; ZHOU et al., 2006).

### **Monitoramento de Estabilidade de Tensão “AM-3”**

As ferramentas de análise de estabilidade de tensão, comumente denominadas como VSA (*Voltage Stability Assessment*), têm a função de determinar o estado de operação

(seguro ou inseguro) e as margens de estabilidade de tensão do sistema sob determinadas condições. Geralmente, as análises são realizadas através de simulações para um conjunto de potenciais contingências, considerando determinados critérios de estabilidade, como a mínima margem de segurança e a reserva de potência reativa em diferentes áreas. Quando é diagnosticada alguma condição insegura de operação são analisadas as possíveis ações preventivas e corretivas, como redespacho de geração, chaveamento de banco de capacitores e controle de tapas de transformadores, para garantir a operação segura do sistema.

O uso da medição fasorial sincronizada em ferramentas VSA ainda é uma aplicação pouco explorada, apesar de sua grande relevância. São relatadas algumas experiências dessa aplicação em *Long Island*, uma ilha próxima a cidade *New York*. O sistema elétrico de Long Island, coordenado pela empresa LIPA (*Long Island Power Authority*), apesar de ter seu sistema sudoeste com fortes interligações ao sistema de New York, apresenta deficiências de interligações e de geração nas demais regiões (nordeste e noroeste), ocasionando problemas de níveis de tensão. Para resolver este problema, são utilizados bancos de capacitores, fixos e variáveis, conectados em paralelo ao sistema de transmissão. Este tipo compensação reativa gera um perfil de tensão virtualmente plano (*flat*), de tal forma que os níveis de tensão não fornecem, em tempo hábil, informações sobre a possível ocorrência de colapsos de tensão, conforme ilustrado na Figura 2.6 (NIGLYE et al., 2005).

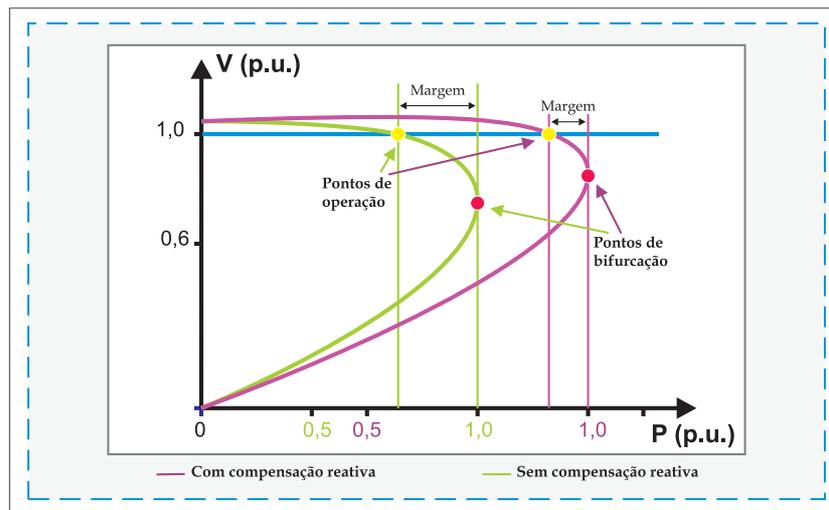


Figura 2.6: Decréscimo das margens de segurança com incremento de capacitância *shunt* (adaptado de Niglye et al. (2005)).

Para solucionar tal questão, foram instaladas duas PMUs em subestações de 138kV do sistema oeste, na cidade de Gardem, e outras duas em subestações de 23kV do

sistema leste, na cidade de Buell. Os dados das PMUs são utilizados em uma ferramenta baseada em um modelo equivalente de duas barras do sistema, com o propósito de monitorar as margens de estabilidade de tensão do sistema. Essa ferramenta está em fase inicial de desenvolvimento e os primeiros resultados indicam um bom desempenho, embora existam alguns aprimoramentos a serem realizados, como a instalação de novas PMUs (NIGLYE et al., 2005).

Além dessa experiência, em Khatib et al. (2004) e Yi et al. (2001), são citados alguns trabalhos que propõem o uso da medição fasorial em algoritmos baseados na teoria da árvore de decisão (DT - *Decision Tree*) e na curva potência-tensão (PV).

### Monitoramento do Estado de Operação de Geradores “AM-4”

A finalidade da aplicação de Monitoramento do Estado de Operação de Geradores é monitorar as margens de segurança, fornecendo informações sobre condições inseguras de operação para a melhoria da confiabilidade e a redução de custos operacionais de geradores.

Esse monitoramento é realizado através de medições fasoriais de tensão e corrente, utilizando uma PMU instalada na barra terminal do gerador. A partir dessas medições, são calculadas as grandezas internas do gerador (tensão e ângulo), que associadas às suas características construtivas, tornam possível a obtenção da curva P-Q do gerador (Figura 2.7), cuja área interna é definida pelos limites de corrente de estator e rotor, pela potência primária e pela estabilidade, fornecendo a região viável de operação do gerador (XIE et al., 2006).

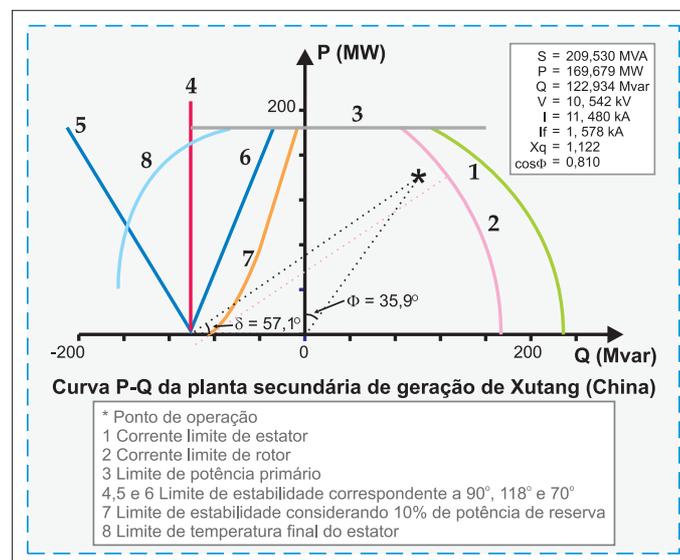


Figura 2.7: Curva P-Q de um gerador (adaptado de Xie et al. (2006)).

A partir do monitoramento dos limites de operação e do próprio ponto de operação, obtido pelo SPMSs, é possível monitorar as margens de segurança operacionais do gerador em tempo real. Constatou-se que aplicação da medição fasorial sincronizada no monitoramento da operação de geradores é ainda pouco explorada, pois foram encontradas citações dessa aplicação apenas na China, em fase de pesquisa.

### 2.2.3 Aplicações de Controle e Proteção “ACP”

As aplicações de Controle e Proteção têm a função de melhorar a operação do sistema através de ações preventivas, corretivas e restaurativas, baseadas na análise sistêmica. Estas são divididas em: Estrutura de Predição para Esquema de Controle Emergencial em tempo real; Predição e Alarme de Estabilidade Angular em SPMSs; Identificação de perturbações em tempo real; e Controle Automático de Tensão.

#### Estrutura de Predição para Esquema de Controle Emergencial em tempo real “ACP-1”

Os sistemas de controle de emergência têm o objetivo de atuar de forma rápida e eficiente sempre que as restrições operacionais do sistema são violadas, visando restabelecer as condições normais de operação. Em muitos casos, faz-se necessário realizar desligamentos intencionais como: a abertura de linhas, a desconexão de geradores ou o corte de carga para eliminar situações de emergência extremamente críticas.

Conforme Xie et al. (2006), um dos principais requisitos desses sistemas é o rápido tempo de resposta, na ordem de 10 a 100ms, o que torna necessário determinar estratégias de controle a priori. Nos esquemas convencionais de emergência, tais estratégias são estabelecidas a partir de simulações *off-line* utilizando, geralmente, o critério de contingências simples (N-1).

Na ocorrência de um distúrbio, a primeira etapa do controle de emergência é a verificação das condições de estabilidade do sistema. Detectando-se riscos de comportamento instável, inicia-se o processo de varredura nas estratégias de controle, baseando-se nas condições de operação pré-falta e nas características do distúrbio. Quando encontrada a estratégia de controle mais adequada, ela é executada com a máxima rapidez possível, a fim de evitar um colapso parcial ou total do sistema.

De acordo com Song, Bi e Yang (2005), esses procedimentos de controle de emergência apresentam duas grandes limitações. A primeira diz respeito à inviabilidade de abranger todas as possíveis contingências, em virtude da constante mudança nas condições de operação e de topologia da rede. A segunda limitação se refere à forma com que as ações de controle são definidas, ou seja, o uso de simulações *off-line* baseadas em mo-

delos e parâmetros, cuja precisão é de difícil obtenção, bem como a determinação das condições de operação pré-falta.

Na China, o uso da medição fasorial sincronizada tem sido proposto para melhorar o desempenho dos sistemas de controle de emergência, devido à sua elevada rapidez, precisão e capacidade de monitoramento da dinâmica do sistema. Shi, Xie e Han (2005), Yingtao, Yonghua e Junxian (2005) relatam pesquisas envolvendo o uso de SPMSs em esquemas especiais de controle de emergência, tais como: a proteção *Out-Of-Step*, cuja finalidade é atuar em condições de emergência, através da abertura de interligações e cortes de carga, e em relés de subfrequência (UFLS - *Under Frequency Load Shedding*), visando minimizar cortes de carga. Ainda na China, o SGCC (*State Grid Corporation of China*), com objetivo de criar um sistema de defesa coordenado, estabeleceu um plano preliminar de desenvolvimento das aplicações do SPMS, dividido nas seguintes etapas (XIE et al., 2006):

- **etapa I** - desenvolver ferramentas de verificação de segurança operacional e controle de predição, em intervalos de 5 minutos, usando dados do centro de despacho, EMS/SCADA e SPMS. No início de 2006, essa etapa estava em fase de conclusão;
- **etapa II** - verificar a segurança dinâmica e realizar ações de controle em intervalos de tempo, da ordem de segundos (conclusão prevista para 2006);
- **etapa III** - desenvolver um sistema central de controle e proteção em tempo real. Previsão de início em 2005 e conclusão em 2008.

Nos Estados Unidos, na Coréia e na França, também existem alguns estudos envolvendo o uso de dados fasoriais no controle de emergência como, por exemplo, em relés de tendência de aceleração (ATR - *Acceleration Trend Relay*), em esquemas especiais de detecção de perda de sincronismo e na análise da estabilidade transitória (KOSTEREV; ESZTERGALYOS; STIGERS, 1998; FAUCON; DOUSSET, 1997; YI et al., 2001).

### **Predição e Alarme de Estabilidade Angular em SPMSs “ACP-2”**

O estudo de estabilidade em SEE é uma tarefa extremamente complexa, que teve sua origem no problema de transferência da potência gerada até os centros de carga, através de longas linhas de transmissão (KUNDUR, 1994).

Os primeiros estudos de estabilidade em SEE eram baseados em modelos relativamente simples, como o método equivalente de duas máquinas (YUAN et al., 2005). Entretanto, o grau de complexidade nos estudos de estabilidade aumentou consideravelmente com a expansão do sistema, a incorporação de novas tecnologias e o aumento

da interdependência entre áreas, sinalizando a necessidade de aprimorar as ferramentas utilizadas nos estudos.

Nas últimas décadas, várias teorias e métodos têm sido propostos para a análise de estabilidade, como os sistemas multimáquinas baseados no método da função descritiva e modelos alternativos de geradores (YUAN et al., 2005). Tais métodos, apesar de apresentarem bons resultados, utilizam modelos complexos que requerem grande esforço computacional, tornando o uso inadequado em tempo real, devido aos elevados tempos de resposta envolvidos. Conforme Yuan et al. (2005), estes métodos poderiam ser simplificados com o uso da medição fasorial sincronizada e o tempo de processamento poderia ser reduzido a patamares compatíveis às aplicações de tempo real. Os Estados Unidos e a China já vêm explorando essa aplicação, usando teorias baseadas em estimativas da função energia (cinética e potencial) e no método de Lyapunov (CHOW et al., 2006; YUAN et al., 2005).

Na Coréia, uma das principais motivações para o desenvolvimento de um projeto de SMPS visa a análise da segurança dinâmica do sistema. Este projeto foi organizado em duas etapas, sob coordenação da KEPCO (*Korea Electric Power Co.*). A primeira previa, até 2002, a instalação de oito PMUs em estações de geração e subestações com níveis de tensão de 345kV e 756kV. A segunda etapa compreendia a expansão desse sistema através da instalação de dezesseis novas PMUs. Atualmente, dentre as principais pesquisas em andamento, destaca-se o desenvolvimento de uma ferramenta de análise da estabilidade angular (TSA - *Transient Stability Assessment*), baseada no modelo equivalente máquina barramento infinito (SIME - *Single Machine Equivalent*) e no critério de áreas iguais, usando dados de SPMSs. O propósito dessa ferramenta é permitir a predição de instabilidade angular em tempo real e, dessa maneira, indicar possíveis condições inseguras de operação (YI et al., 2001).

### Identificação de perturbações em tempo real “ACP-3”

Conforme Silva (2003), a maioria das interrupções no fornecimento de energia elétrica em Sistemas Elétricos de Potência estão associadas a falhas em LTs, devido principalmente a sua extensão, complexidade operacional e ao ambiente em que se encontram. A incidência deste tipo de ocorrência é ilustrada na Tabela 2.1, que resume as ocorrências em um sistema de 500kV durante um período de dez anos (dados extraídos de Silva (2003)).

O significativo número de falhas em LTs sinaliza a necessidade de identificar e localizar faltas com rapidez e precisão, como forma de minimizar a duração de interrupções, melhorar a confiabilidade do sistema e reduzir custos operacionais.

A aplicação de SPMSs na identificação de faltas, em LTs, visa associar medidas

Tabela 2.1: Registro de faltas permanentes em um sistema de 500kV.

Equipamentos	Número de Faltas
Linhas de Transmissão	82
Circuitos disjuntores	4
Autotransformadores	6
Barramentos	1
Geradores	1
Erro Humano	5

fasoriais às técnicas de localização de faltas. O objetivo dessa aplicação é explorar as informações da medição fasorial sob o paradigma de visão sistêmica, visando fornecer ao operador do sistema, a localização precisa de faltas sustentadas, bem como estimativas da localização de faltas transitórias, que podem ser utilizadas para indicar pontos fracos no sistema e evitar futuros problemas de maior grandeza.

No Brasil, no âmbito do projeto MedFasee<sup>3</sup>, foi proposta uma metodologia para localização de faltas em LTs utilizando o método de duas extremidades, baseado no cálculo dos fasores de tensão e corrente. Os resultados iniciais dos estudos de simulação demonstram o bom desempenho do sistema implementado, com erro absoluto e relativo máximo de 0,57 km e 2,90%, respectivamente (BETTIOL et al., 2005).

Em Taiwan, existem pesquisas propondo a adaptação de PMUs para a incorporação de relés de proteção de linhas de transmissão. É proposta a utilização de índices de diferenciação e localização das faltas, em termos das componentes de Clarke, obtidas através de medições fasoriais. Os primeiros resultados obtidos indicam, além do bom desempenho na diferenciação entre falhas internas e externas, a rápida localização de falhas internas, com tempos inferiores a 6 ms (JIANG; LIU; CHEN, 2002).

Em Wang et al. (2007), Gao, He e Jiang (2002) são relatadas também pesquisas na China, envolvendo o uso de SPMSs na identificação e localização de faltas e em esquemas especiais para a proteção diferencial de LTs.

### Controle Automático de Tensão (ACV) “ACP-4”

O objetivo do controle automático de tensão é obter a alocação ótima de potência reativa entre geradores, compensadores *shunt* e outros controladores de potência reativa, mantendo-se as tensões dentro dos limites permissíveis.

A geração, o controle e o consumo de potência reativa são geograficamente distribuídos, o que torna o uso de SPMSs extremamente conveniente. Contudo, até o

<sup>3</sup>Este projeto de pesquisa foi parcialmente financiado pelo contrato FNDCT/CT-ENERG/FINEP 01.02.0039.00 e pela Reason Tecnologia S.A.

momento, não há muitos relatos na literatura sobre essa aplicação. Apenas na China, Xie et al. (2006) relata pesquisas propondo a formulação e a resolução de um problema de otimização usando dados de medição fasorial, que seria atualizado em intervalos periódicos de tempo para ajustar equipamentos de regulação de potência reativa.

#### 2.2.4 Aplicações Especiais “AE”

As Aplicações Especiais têm uma função extremamente importante nos estudos de engenharia de SEE, que é avaliar a confiabilidade dos resultados de simulações e contribuir para a modelagem de novos sistemas e equipamentos. Tais aplicações compreendem a Validação de Simulações (AE1) e a Identificação de Parâmetros e Modelos (AE2), as quais têm a finalidade de reduzir as incertezas em simulações da dinâmica do sistema e, eventualmente, a atualização de modelos e sistemas de controle e proteção (KOSTEREV, 2004; XIE et al., 2006).

##### Validação de Simulações “AE-1”

O uso de ferramentas de simulação é de grande importância para o planejamento, a operação e o controle de SEE, pois permitem estudar, de antemão, questões relacionadas a contingências, níveis de carregamento e de tensão, além de outros aspectos importantes para a manutenção e melhoria do desempenho do sistema. No entanto, para obter-se bons resultados é necessário que os modelos de simulação sejam realísticos. Caso contrário, podem prejudicar a operação do sistema ou, ainda, expô-lo a condições de risco.

Existem vários relatos de problemas associados a erros de modelagem e simulação em SEE como, por exemplo, o blecaute de agosto de 1996 no sistema WSCC (*Western Systems Coordinating Council*), onde os resultados das simulações indicavam o comportamento estável, enquanto que o comportamento do sistema era instável (HAUER; BESHIR; MITTELSTADT, 2000). Outro caso relatado é a ocorrência de agosto de 2000, onde a abertura da interligação entre as províncias de *Alberta* e *British Columbia* (Canadá), provocou oscilações eletromecânicas sustentadas durante aproximadamente um minuto. Entretanto, os resultados das simulações indicavam uma resposta dinâmica bem amortecida (KOSTEREV, 2004).

Para evitar a ocorrência desse tipo de problema, tornou-se imprescindível adotar procedimentos para a verificação e a validação de modelos e simulações. Após o evento de agosto 1996, o WSCC passou a exigir que geradores com capacidade superior a 10MW fossem testados a cada cinco anos para a validação de modelos. Com o surgimento do WECC (*Western Electric Coordinating Council*), em substituição ao WSCC,

os proprietários de geradores passaram a ser responsáveis pela determinação dos modelos de seus equipamentos (KOSTEREV, 2004).

Com o desenvolvimento dos SPMSs, a aplicação natural foi a validação de simulações, como forma de reduzir as incertezas em simulações da dinâmica do sistema e, eventualmente, contribuir para o desenvolvimento de novos modelos. Uma das primeiras aplicações de SPMSs exploradas na China foi a validação de simulações (XIE et al., 2006). Grandes distúrbios foram aplicados intencionalmente no sistema real para comparar a resposta dinâmica obtida com os resultados das simulações. Durante um teste, em 24 de março de 2004, foi aplicado um curto-circuito trifásico em uma barra de 500kV do sistema noroeste da China. O comportamento do sistema durante o evento foi registrado pelo SPMS e comparado com as simulações. Os resultados obtidos indicaram desvios significativos entre a resposta das simulações e o comportamento real do sistema, sinalizando a necessidade de ajuste no modelo original e nos seus parâmetros.

Pesquisas de validação de simulações usando dados de PMUs são também citadas nos Estados Unidos, na Rússia e na Suíça (KOSTEREV, 2004; SCALA et al., 2006; BERTSCH et al., 2004).

### Identificação de Parâmetros e Modelos “AE-2”

Em muitos casos, os parâmetros indicados pelos fabricantes são imprecisos ou podem sofrer variações no tempo, sob determinadas condições de operação, o que faz necessária a verificação periódica de parâmetros e modelos, para garantir a confiabilidade nos resultados das simulações.

O uso de SPMSs, através da capacidade de monitoramento da dinâmica do sistema, visa contribuir nos procedimentos de identificação de parâmetros e de modelo. Esta aplicação já vem sendo explorada por algumas empresas com o objetivo de fornecer subsídios para comparação de resultados e, eventualmente, atualização de modelos e sistemas de controle e proteção.

Nos Estados Unidos, a empresa BPAT (*Bonneville Power Administration Transmission*), reconhecendo o impacto significativo dos geradores no desempenho dinâmico do sistema, instalou PMUs nas principais estações de geração conectadas à sua rede, como demonstrado Tabela 2.2.

Os dados dessas PMUs são utilizados em um programa desenvolvido pela empresa General Electric (GE) para a validação de modelos de geradores e sistemas de controle, baseado no modelo máquina-barramento infinito (KOSTEREV, 2004). Em Huang, Kosterev e Guttromson (2006) é proposta uma metodologia baseada na simulação dinâmica híbrida, utilizando medidas fasoriais e modelos matemáticos. A idéia central é desmembrar o sistema em subsistemas a analisá-los isoladamente, o que facilitaria a

Tabela 2.2: PMUs em estações de geração conectadas à BPAT.

Usinas	Capacidade (MW)
The Dalles	1776
John Day	2576
Grand Coulee 3rd Powerhouse	4598
Colstrip 3 e 4	1526

identificação e o ajuste dos modelos problemáticos. Os resultados apresentados indicam como principais vantagens: a comparação direta dos resultados com as medições; a não necessidade do ajuste das condições pré-falta; a fácil interpretação e localização dos modelos problemáticos; e a viabilidade de automatizar o processo de validação de modelos.

### 2.2.5 Síntese das Aplicações de SPMSs

O quadro ilustrado pela Figura 2.8, sintetiza o conjunto de aplicações em estudo e implementação enumeradas em cada país, conforme seus respectivos experimentos. As aplicações básicas não foram apresentadas, por estarem presentes em qualquer SPMSs.

		EUA	China	Brasil	México	Coréia	Japão	Suíça	Rússia	Espanha	França	Países Nórdicos
Monitoramento de oscilações de baixa frequência	AM1	■	■	■	■		■		■		■	■
Estimação de estados híbrida	AM2	■	■							■		
Monitoramento da estabilidade de tensão	AM3	■						■				
Monitoramento do estado de operação de geradores	AM4		■									
Controle de emergência	ACP1	■	■			■					■	
Predição, alarme e controle de estabilidade angular	ACP2	■	■	■		■		■				
Identificação de faltas	ACP3		■	■								
Controle automático de tensão	ACP4		■									
Validação de simulações	AE1	■	■									■
Identificação de modelos e parâmetros	AE2	■	■				■					

Figura 2.8: Aplicações de SPMSs em diversos países.

Observa-se na Figura 2.8 o crescente interesse pelas aplicações da tecnologia de medição em diversos países. Entretanto, tais aplicações se encontram em diferentes estágios de desenvolvimento e aplicação, sendo que a grande maioria ainda está em fase inicial de pesquisa e novas aplicações poderão ser identificadas.

Na Tabela 2.3, apresenta-se uma síntese do estágio de desenvolvimento das aplicações de SPMSs, constatado durante o período de elaboração desse estudo.

Tabela 2.3: Resumo: Aplicações de SPMSs

Aplicação	Estágio de Desenvolvimento
Monitoramento do Estado de Operação de Geradores	Em fase embrionária de desenvolvimento. Foram encontrados relatos sobre essa função apenas na China.
Análise de Oscilações de Baixa Freqüência em tempo real	Pesquisas acerca dessa aplicação estão mais avançadas. No entanto, ainda não há consenso sobre a técnica de análise espectral mais adequada para analisar oscilações de baixa freqüência.
Estimação de Estados Híbrida	Em fase de pesquisa, as quais visam à alocação ótima de PMUs, bem como as formas de incluir as medidas fasoriais no processo de estimação de estados, sem grandes mudanças nos sistemas SCADA/EMS e nos algoritmos de estimação. Na Espanha, mais especificamente na empresa Sevillana de Electricidad (CSE), há um estimador de estados adaptado para processar medidas fasoriais em operação atualmente.
Estrutura de Predição para Esquemas de Controle de Emergência em tempo real	Está em fase de desenvolvimento. Existem pesquisas nos Estados Unidos, na Coréia e na França propondo o uso da medição fasorial em relés de tendência aceleração (ATR - <i>Acceleration Trend Relay</i> ), em esquemas especiais de detecção de perda de sincronismo e na análise de estabilidade transitória. Essa aplicação é também um dos principais objetivos do projeto de desenvolvimento das aplicações de SPMSs na China, que prevê a criação de um sistema central de controle e proteção, a partir de dados de medição fasorial sincronizada.

Predição e Alarme de Estabilidade Angular em SPMSs	As principais pesquisas em andamento visam simplificar os modelos clássicos de estudo de estabilidade, como o critério de áreas iguais estendido e o método de Lyapunov, através do uso da medição fasorial sincronizada. O objetivo é reduzir o tempo de processamento desses métodos a patamares compatíveis às aplicações de tempo real.
Identificação de Perturbação em Tempo Real	Os estudos de identificação de faltas baseados em SPMSs estão em fase de pesquisa. Tais estudos, em sua maioria, envolvem o uso de dados de medição fasorial sincronizada em métodos baseados na impedância.
Monitoramento de Estabilidade de Tensão	Esta aplicação está em fase inicial de pesquisa. São relatadas algumas experiências na cidade de <i>Long Island</i> , baseadas em um modelo equivalente do sistema.
Validação de Simulações	Encontra-se em um estágio mais avançado de desenvolvimento e foi uma das primeiras aplicações de SPMSs exploradas na China.
Identificação de Parâmetros e Modelos	Está em fase de desenvolvimento. Atualmente, a empresa BPAT já utiliza essa aplicação na validação de modelos de geradores e de sistemas de controle. As pesquisas em andamento visam integrar tal aplicação à Validação de Simulações, a fim de automatizar os processos de atualização de modelos de simulações em tempo real.
Controle Automático de Tensão (AVC)	Em fase embrionária de desenvolvimento. Foram encontrados relatos sobre essa função apenas na China.

## 2.3 Experiências no Brasil

No Brasil, são dois os principais projetos envolvendo o desenvolvimento de SPMSs: Projeto do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), ainda em fase de especificação, e o Projeto MedFasee. Estes projetos, embora tenham objetivos específicos distintos, compartilham do objetivo geral de contribuir para o desenvolvimento de SPMSs no Brasil, visando a melhoria do desempenho do Sistema Elétrico Brasileiro, do ponto de vista operacional e econômico.

### 2.3.1 Projeto ONS

O objetivo principal do projeto de medição fasorial do ONS é aumentar a confiabilidade do SIN, através do uso da tecnologia de medição sistêmica para monitoramento e controle. Inicialmente, o objetivo desse projeto é dispor de uma infra-estrutura de medição sincronizada de fasores robusta, com disponibilidade adequada e segura para (ARAUJO et al., 2007):

- **Implementar um sistema de registro de fasores** - tem o objetivo de registrar o desempenho dinâmico do SIN durante perturbações sistêmicas. É previsto o monitoramento de aproximadamente 58 subestações;
- **Aplicar a tecnologia de medição Fasorial para suporte à decisão em tempo real** - visa a melhoria do processo de estimação de estados e o desenvolvimento de ferramentas para a visualização de grandezas em tempo real.

A definição das responsabilidades do ONS e dos Agentes, acerca desse projeto, foi regulamentada pela Resolução Normativa - ANEEL 170/2005. Como atribuições do ONS, as etapas de definição da Arquitetura do SPMS e requisitos do sistema de comunicação, da quantidade e da localização das PMUs, do sistema de registro de fasores, já foi concluída. Atualmente, o projeto se encontra em processo de homologação e definição do cronograma de implantação das PMUs nas instalações dos agentes (MORAES, 2007).

### 2.3.2 Projeto MedFasee

O Projeto MedFasee teve início em 2003, através de uma parceria entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a empresa Reason Tecnologia e a FINEP (EHRENSPERGER, 2002). Um dos resultados do projeto foi o desenvolvimento de um protótipo de SPMS, constituído por três unidades de medição fasorial, instaladas nas capitais dos três estados do sul do Brasil (conectadas à rede de baixa tensão) e um concentrador de dados, localizado no LabPlan/UFSC. O protótipo se encontra em operação desde 2004, monitorando grandezas do sistema elétrico brasileiro (DECKER et al., 2004).

Entre os objetivos futuros do projeto estão o desenvolvimento de um protótipo de SPMS de abrangência nacional, com fins acadêmicos, e a continuidade dos desenvolvimentos metodológicos acerca das potenciais aplicações de SPMSs.

Recentemente foi posto em operação um novo protótipo de SPMS na empresa Eletrosul, constituído por quatro PMUs e um PDC. Este protótipo está sendo desenvolvido no âmbito do projeto MedFasee-Eletrosul, através da parceria entre a Eletrosul Centrais

Elétricas, a UFSC e a empresa Reason Tecnologia. Os objetivos iniciais são avaliar o desempenho do protótipo em operação e desenvolver aplicações de monitoramento e localização de faltas.

## 2.4 Considerações Finais

Neste capítulo, apresentaram-se as principais aplicações de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada, categorizadas em: aplicações básicas; de monitoramento; controle e proteção; e especiais. Estas aplicações possuem grandes potencialidades para a melhoria dos sistemas de supervisão, controle e proteção empregados em SEE, tais como: o monitoramento da operação de geradores; a análise de oscilações de baixa frequência; a melhoria nos processos de estimação de estados; a localização de faltas sustentadas e transitórias em LTs; melhorias das ações preventivas, corretivas e restaurativas dos sistema de controle; e a verificação e a validação de modelos. Constatou-se também que a grande maioria destas aplicações de SPMSs se encontra em fase inicial de pesquisa ou é ainda pouco explorada. Em relação ao Brasil, percebe-se também o crescente interesse pelo desenvolvimento e implementação da medição fasorial, evidenciado através dos Projetos MedFasee, MedFasee-Eletrosul e ONS.

## Capítulo 3

# Análise da Dinâmica de SEE via Modelos Paramétricos

Este capítulo apresenta os desenvolvimentos metodológicos para a análise da dinâmica de SEE, usando dados de monitoramento de sistemas de medição fasorial sincronizada e modelos paramétricos de análise espectral.

A análise espectral tem o objetivo de extrair informações relevantes de um sinal amostrado, em geral contaminado por ruídos. Existem duas principais abordagens para tratar o problema: os métodos convencionais e os paramétricos (MOREIRA et al., 1998).

Aveleda (2003) se refere aos métodos convencionais, como aqueles que fazem uso da transformada de Fourier e suas variantes para realizar a análise espectral. Estes métodos utilizam janelas de tempo que truncam as extremidades do sinal, causando problemas de resolução (distinção entre frequências próximas), devido à suposição de que o sinal não se estende infinitamente através da janela.

A abordagem baseada nos métodos paramétricos trata o problema da análise espectral a partir da determinação de um modelo que se aproxime do processo real, o que elimina a necessidade do emprego de janelas de tempo, reduzindo assim seus impactos de distorção (MOREIRA et al., 1998). Dessa forma, a estimação espectral se resume em estimar os parâmetros do modelo assumido. Assim, a melhoria da resolução e da confiabilidade depende diretamente da apropriada seleção do modelo, de tal forma que represente adequadamente o processo em estudo (MARPLE, 1987).

A estimação espectral paramétrica envolve, basicamente, três etapas. A primeira diz respeito à apropriada seleção do modelo, baseada nos dados amostrados. A segunda etapa, consiste em estimar os parâmetros do modelo assumido utilizando, em geral, técnicas de mínimos quadrados. Na etapa final, obtém-se a função de densidade espectral de potência, a partir dos parâmetros estimados na etapa anterior.

Abordam-se neste estudo os modelos paramétricos associados ao método de Prony e aos modelos Auto-Regressivo (AR- *Auto-Regressive*) e Auto-Regressivo de Média Móvel (ARMA - *Auto-Regressive Moving Average*), por serem métodos amplamente difundidos nos estudos de análise espectral (MARPLE, 1987; CARDOSO, 2000).

As definições matemáticas apresentadas a seguir, seguem a nomenclatura proposta em Marple (1987), que apresenta pequenas diferenças em relação a utilizada nos estudos de Sistema Elétricos de Potência.

### 3.1 O Método de Prony

O método de Prony foi desenvolvido pelo francês Gaspard Riche Baron de Prony, em 1795, que acreditava que as leis que governam a expansão de gases poderiam ser modeladas através de uma soma de exponenciais amortecidas (MARPLE, 1987). Apesar de ser um dos primeiros métodos paramétricos de análise espectral, é ainda muito utilizado em diversas áreas, tais como sistemas de comunicação, localização de objetos por radar, análise modal de estruturas mecânicas, identificação paramétrica de sistemas dinâmicos e redução de ordem de modelos (CARDOSO, 2000; ROJAS, 1994; MARINI, 2005).

Embora não seja uma técnica de estimação espectral, o método de Prony tem uma relação próxima aos algoritmos de predição linear de mínimos quadrados (MARPLE, 1987). A principal diferença é que o método de Prony se baseia em um modelo determinístico, enquanto que as técnicas de estimação espectral representam modelos aleatórios. Basicamente, o método de Prony visa estimar um conjunto de parâmetros associados a um sinal amostrado, a partir de uma combinação linear de exponenciais complexas.

Esse método pode ser dividido em três etapas: a primeira consiste em determinar um Modelo de Predição Linear (MPL), que se ajusta aos dados disponíveis; na segunda etapa, são determinadas as raízes do polinômio formado pelos coeficientes do MPL. A partir dessas raízes, é estimada a frequência e o amortecimento de cada termo exponencial. Na última etapa, são utilizadas informações das etapas anteriores, para estimar a amplitude e a fase de cada termo. Essas etapas são formalizadas matematicamente a seguir.

#### 3.1.1 Descrição Matemática

Seja  $x(n)$  um conjunto de amostras de um sinal discreto, uniformemente espaçadas por  $T$  (período de amostragem). O propósito geral do método de Prony é estimar os parâmetros da Equação 3.1, de tal forma que  $x(n) \cong \hat{x}(n)$ :

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p A_i e^{\alpha_i(n-1)T} \cos(2\pi f_i(n-1)T + \phi_i), n = 1, \dots, N. \quad (3.1)$$

onde,

$A_i$ : amplitude da componente  $i$ ;

$\alpha_i$ : coeficiente de amortecimento da componente  $i$  ( $sec^{-1}$ );

$\phi_i$ : fase da componente  $i$  (radianos);

$f_i$ : frequência da componente  $i$  (Hz);

$p$ : ordem do modelo;

$N$ : número de amostras.

Utilizando as propriedades

$$\cos(2\pi f_i t + \phi_i) = \frac{e^{j(2\pi f_i t + \phi_i)} + e^{-j(2\pi f_i t + \phi_i)}}{2} \quad (3.2)$$

$$e^{xk} = (e^x)^k, \quad (3.3)$$

e assumindo  $\hat{x}(n) = x(n)$ , a Equação (3.1) pode ser reescrita como:

$$x(n) = \sum_{i=1}^p h_i z_i^{n-1}, \quad n = 1, \dots, N, \quad (3.4)$$

onde

$$h_i = \frac{A_i}{2} e^{\pm j\phi_i} \quad (3.5)$$

$$z_i = e^{(\alpha_i \pm j2\pi f_i)T} \quad (3.6)$$

A Equação 3.4 pode ser reescrita na forma matricial:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_p^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_p^1 \\ z_1^2 & z_2^2 & \dots & z_p^2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{pmatrix}}_{(\Psi)} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \vdots \\ h_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(N) \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

A matriz  $\Psi$  tem uma estrutura de vandermonde e acopla o elemento “ $z$ ” as amostras  $x(n)$ . A grande contribuição do método de Prony foi encontrar uma forma de desacoplar esses elementos. A idéia principal foi provar que a Equação (3.4) satisfaz uma

equação linear homogênea a diferenças com coeficientes constantes (MARPLE, 1987). Para encontrar esta equação a diferenças, o primeiro passo foi definir um polinômio, com  $p$  raízes,

$$P(z) = \prod_{i=1}^p (z - z_i) = \sum_{m=0}^p a(m)z^{p-m}, \quad (3.8)$$

onde  $a(m)$  são os coeficientes do polinômio, sendo  $a(0) = 1$ . Este polinômio é o próprio polinômio característico da função de transferência no plano  $\mathbb{Z}$ , associado ao conjunto de amostras do sinal de entrada  $x(n)$ .

Deslocando os índices da Equação 3.4 de  $n$  para  $n - m$  e multiplicando por  $a(m)$ , tem-se:

$$a(m)x(n - m) = a(m) \sum_{i=1}^p h_i z_i^{n-m-1} \quad (3.9)$$

Então, somando os termos da Equação 3.9, de  $m = 0$  até  $m = p$ ,

$$\sum_{m=0}^p a(m)x(n - m) = \sum_{m=0}^p a(m) \sum_{i=1}^p h_i z_i^{n-m-1} = \sum_{i=1}^p h_i \sum_{m=0}^p a(m) z_i^{n-m-1} \quad (3.10)$$

válido para  $p + 1 \leq n \leq 2p$ , e substituindo  $z_i^{n-m-1}$  por  $z_i^{n-p-1} z_i^{p-m}$ , obtém-se:

$$\sum_{m=0}^p a(m)x(n - m) = \sum_{i=1}^p h_i z_i^{n-p-1} \underbrace{\sum_{m=0}^p a(m) z_i^{p-m}}_{P(z)} \quad (3.11)$$

Sendo  $z_k$  as raízes do polinômio  $P(z)$  (Equação 3.8), tem-se:

$$\sum_{m=0}^p a(m)x(n - m) = \sum_{i=1}^p h_i z_i^{n-p-1} P(z_k) = 0 \quad (3.12)$$

Dessa forma a equação de diferenças

$$\sum_{m=0}^p a(m)x(n - m) = 0 \quad (3.13)$$

satisfaz a Equação 3.4.

Reescrevendo a Equação 3.13 na forma matricial, obtém-se

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x(p) & x(p-1) & \cdots & x(1) \\ x(p+1) & x(p) & \cdots & x(2) \\ x(p+2) & x(p+1) & \cdots & x(3) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x(n-1) & x(n-2) & \cdots & x(n-p) \end{pmatrix}}_{\Theta_h} \begin{pmatrix} a(1) \\ a(2) \\ a(3) \\ \vdots \\ a(p) \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} x(p+1) \\ x(p+2) \\ x(p+3) \\ \vdots \\ x(n) \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Observa-se que os coeficientes  $a(1), \dots, a(p)$  são dependentes apenas do tempo, ou seja, é possível desacoplar o elemento  $z_i$  do tempo. A Equação 3.14 é chamada de sistema de Yule-Walker e representa o modelo de predição linear (MPL). A matriz  $\Theta_h$  é denominada, na literatura, como matriz de Hankel.

Normalmente, para se obter uma boa precisão na estimação dos parâmetros do método de Prony é conveniente utilizar-se  $n > 2p$  (AVELEDA, 2003). Isso faz com que o sistema dado pela Equação 3.14 se torne sobre-determinado (o número de equações é maior do que o número de incógnitas). Em geral, para resolver esse tipo de problema, são utilizados os métodos de mínimos quadrados e de decomposição por valores singulares (SVD - *Singular Value Decomposition*), sendo o segundo de uso mais disseminado.

A partir da solução da Equação 3.14, obtém-se os coeficiente do polinômio da Equação 3.8, cujas raízes determinam os coeficientes de amortecimento ( $\alpha_i$ ) e as frequências ( $f_i$ ) de cada termo exponencial, através das seguintes expressões:

$$\alpha_i = \left( \frac{\ln |z_i|}{T} \right) \quad (3.15)$$

$$f_i = \tan^{-1} \left( \frac{Im(z_i)}{Re(z_i)} \right) \frac{1}{2\pi} \quad (3.16)$$

Finalmente, para se obter as amplitudes ( $A_i$ ) e as fases iniciais ( $\theta_i$ ), são utilizadas as expressões 3.17 e 3.18, onde os coeficientes complexos  $h_1, \dots, h_i$  são obtidos substituindo-se as raízes ( $z_i$ ) na Equação 3.7.

$$A_i = |h_i| \quad (3.17)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{Im(h_i)}{Re(h_i)} \right) \quad (3.18)$$

### 3.1.2 Erro do modelo de predição linear

O vetor de erros do modelo de predição linear é dado por:

$$\mathbf{e} = |\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}| \tag{3.19}$$

onde  $\hat{\mathbf{x}}$  é um vetor  $p \times 1$  formado pelos elementos  $\hat{x}(n), \forall n = 1, \dots, p$ . Seja  $\Theta_h$  a matriz de Hankel e  $\mathbf{a}$  um vetor dado pelos coeficientes do modelo de predição linear, então obtém-se:

$$\hat{\mathbf{x}} = \Theta_h * \mathbf{a} \tag{3.20}$$

Assim, substituindo-se a Equação 3.20 em 3.19, tem-se:

$$\mathbf{e} = |\mathbf{x} - \Theta_h * \mathbf{a}| \tag{3.21}$$

Geralmente, o erro de predição é utilizado na forma quadrática, designado de potência do erro preditivo, conforme:

$$\rho = \mathbf{e}^2 \tag{3.22}$$

O erro da predição está diretamente associado à ordem do modelo. Por esta razão é comum seu uso em critérios de seleção de ordem. Para a seleção da ordem do modelo de Prony, podem ser utilizados os mesmos critérios adotados no modelo Auto-Regressivo (AR), discutidos a seguir (MARPLE, 1987). Na Figura 3.1, pode ser visualizado o fluxograma do método de Prony.

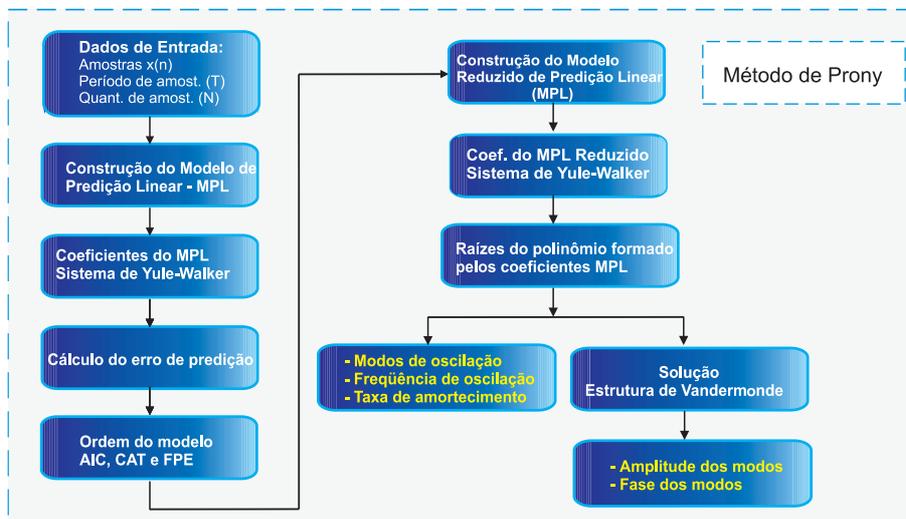


Figura 3.1: Fluxograma do método de Prony.

A partir das amostras do sinal de entrada  $x(n)$  é construído o MPL e são calculados os coeficientes de predição, os quais são utilizados para determinar o erro de predição, dado pela Equação 3.21. Desta maneira, a partir do cálculo do erro de predição é possível se obter a ordem reduzida do modelo e, então, reconstruir o MPL, do qual são calculados os coeficiente de predição e estimados os demais parâmetros do método de Prony.

### 3.1.3 Avaliação do Método de Prony

O método de Prony se baseia em um modelo puramente determinístico e o ajuste faz-se diretamente através das amostras do sinal de entrada, uniformemente espaçadas. Além disso, o método também é indicado para os casos em que a excitação forçada é admitida, como impulso transitório, pois o método necessita de poucos dados amostrais para fornecer resultados satisfatórios. Outra característica importante é que o método de Prony não é um processo iterativo, o que reduz os esforços computacionais, tornando seu uso conveniente em aplicações que requerem curto tempo de processamento.

Em termos práticos, a principal deficiência do método de Prony é a sensibilidade a ruídos. O efeito dos ruídos afeta diretamente a precisão nas estimativas dos parâmetros de frequência e o amortecimento das componentes exponenciais (MARPLE, 1987). Além dessa dificuldade, a identificação da ordem do modelo não é uma tarefa fácil e sobreestimar a ordem do modelo pode gerar modos sem significado físico.

A degradação nos parâmetros estimados pelo método de Prony, decorrente de ruídos do sinal de entrada. Este efeito pode ser reduzida resolvendo-se o sistema de Yule-Walker (ver Equação 3.14) utilizando a teoria de mínimos quadrados, a qual foi adotada no presente trabalho (CARDOSO, 2000).

## 3.2 Modelos Auto-Regressivo e Auto-Regressivo de Média Móvel

Os modelos Auto-Regressivo (AR) e Auto-Regressivo de Média Móvel (ARMA) se baseiam em modelos de séries temporais. Esses modelos podem representar adequadamente vários processos determinísticos e estocásticos. A estrutura geral destes modelos é representada através sistemas lineares invariantes no tempo, definidos por uma função de transferência em  $Z$  dada por (MARPLE, 1987):

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)}, \quad (3.23)$$

onde

$$A(z) = 1 + \sum_{k=1}^p a(n)z^{-k} \quad (3.24)$$

$$B(z) = 1 + \sum_{k=1}^q b(n)z^{-k} \quad (3.25)$$

A resposta no tempo associada à Equação 3.23, corresponde a

$$x(n) = - \sum_{k=1}^p a(k)x(n-k) + \sum_{k=0}^q b(k)u(n-k), \quad (3.26)$$

onde  $x(n)$  é a seqüência de saída, que modela os dados observados, e  $u(n)$  é o sinal de entrada. Para garantir que o sistema seja causal de fase mínima estável, supõe-se que ambos polinômios  $A(z)$  e  $B(z)$ , possuem todos zeros internos ao círculo unitário no plano Z (MARPLE, 1987).

Geralmente, o sinal de entrada  $u[n]$  é desconhecido para propósitos de análise espectral. Vários tipos de processo podem ser assumidos para representar a entrada, tais como: impulso unitário; trem de pulsos; e ruído branco com média zero e variância  $\rho_w$  (KAY, 1987). Neste trabalho foi utilizado o ruído branco como sinal de entrada, por ser o processo normalmente empregado em estudos de análise espectral.

A estrutura de um modelo ARMA pode ser vista na Figura 3.2, onde os parâmetros  $a(k)$  e  $b(k)$  formam as parcelas auto-regressiva e média móvel.

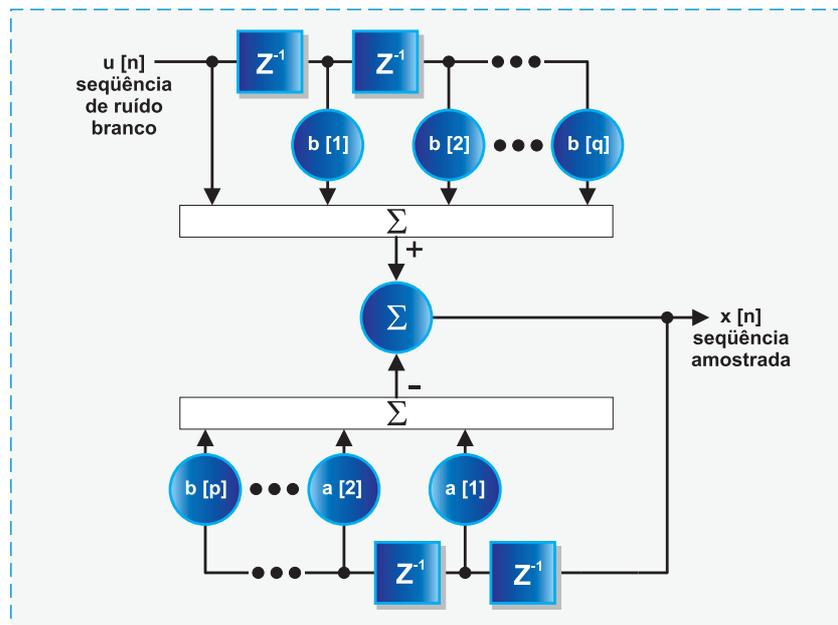


Figura 3.2: Modelo paramétrico ARMA (adaptado de Marple (1987)).

A função de Densidade de Potência Espectral (PSD - *Power Spectral Density*) para o modelo ARMA é dada por:

$$PSD_{ARMA} = T\rho_w \left[ \frac{B(f)}{A(f)} \right]^2 = T\rho_w \frac{eq^t(f)bb^t eq(f)}{ep^t(f)aa^t ep(f)} \quad (3.27)$$

definida para um intervalo de  $-1/2T \leq f \leq 1/2T$ , onde os polinômios  $A(f)$  e  $B(f)$  são definidos como:

$$A(f) = 1 + \sum_{k=1}^p a(k) \exp(-j2\pi f kT) \quad (3.28)$$

$$B(f) = 1 + \sum_{k=1}^q b(k) \exp(-j2\pi f kT) \quad (3.29)$$

Os vetores de  $eq(f)$  e  $ep(f)$  e parâmetros  $a$  e  $b$ , são representados como:

$$\begin{aligned} ep(f) &= \left[ 1 \quad \exp(-j2\pi fT) \quad \cdots \quad \exp(-j2\pi f pT) \right]^t \\ eq(f) &= \left[ 1 \quad \exp(-j2\pi fT) \quad \cdots \quad \exp(-j2\pi f qT) \right]^t \\ a &= \left[ 1 \quad a(1) \quad \cdots \quad a(n) \right]^t \\ b &= \left[ 1 \quad b(1) \quad \cdots \quad b(n) \right]^t \end{aligned} \quad (3.30)$$

onde “p” e “q” indicam o número de parâmetros auto-regressivos e médias móveis, respectivamente. Deste modo, observa-se que a especificação dos parâmetros AR, MA e  $\rho_w$  caracterizam inteiramente a PSD de um modelo ARMA.

Em alguns casos, onde se deseja modelar ruídos nas amostras  $x(n)$ , estes devem ser modelados separadamente da fonte de excitação do ruído  $u(n)$ . Em geral, esta modelagem parte do modelo ARMA, dando origem ao modelo denominado Auto-Regressivo de Média Móvel com entradas exógenas (ARMAX), conforme ilustrado na Figura 3.3 (MARPLE, 1987).

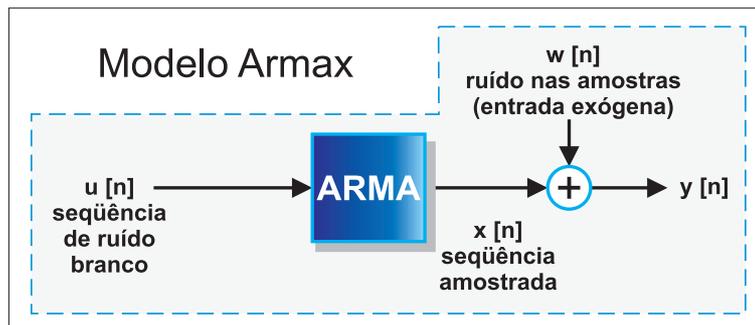


Figura 3.3: Modelo paramétrico ARMAX (adaptado de Marple (1987)).

No caso de todos os parâmetros Auto-Regressivos (AR) serem considerados nulos ( $p = 0$ ), exceto  $a(n) = 1$ , obtém-se o modelo Média Móvel (MA) puro, dado por:

$$x(n) = \sum_{k=1}^q b(k)u(n-k) + u(n) \quad (3.31)$$

Assim, a equação que descreve a PDS do modelo MA é

$$P_{MA}(f) = T\rho_w [B(f)]^2 = T\rho_w e^{qt}(f)bb^t e_q(f) \quad (3.32)$$

A estrutura de um modelo MA é ilustrada na Figura 3.4.

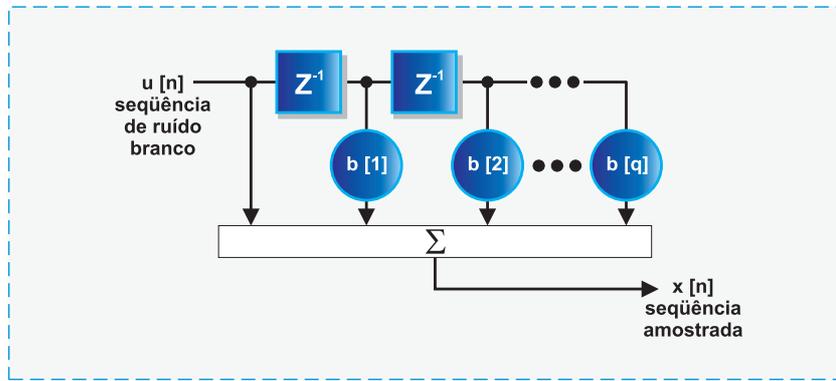


Figura 3.4: Modelo paramétrico MA (adaptado de Marple (1987)).

Entretanto, se todos os parâmetros MA forem considerados nulos ( $q = 0$ ) exceto  $b(0) = 1$ , obtém-se então o modelo AR puro, modelado como

$$x(n) = - \sum_{k=1}^p a(k)x(n-k) + u(n), \quad (3.33)$$

sendo a PDS do modelo AR dada por

$$P_{AR}(f) = \frac{T\rho_w}{[A(f)]^2} = \frac{T\rho_w}{e'p(f)aa'ep(f)} \quad (3.34)$$

O modelo AR é ilustrado na Figura 3.5.

A escolha de um dos três modelos requer algum conhecimento da forma de onda do espectro de frequência. Se o espectro possui forma de vales, e não de picos, então o modelo MA é o mais apropriado. Caso contrário, se o espectro possui forma de picos, e não de vales, então o modelo AR é o mais adequado. O modelo ARMA, em geral, pode representar bem ambos os comportamentos do espectro de frequência (MARPLE, 1987).

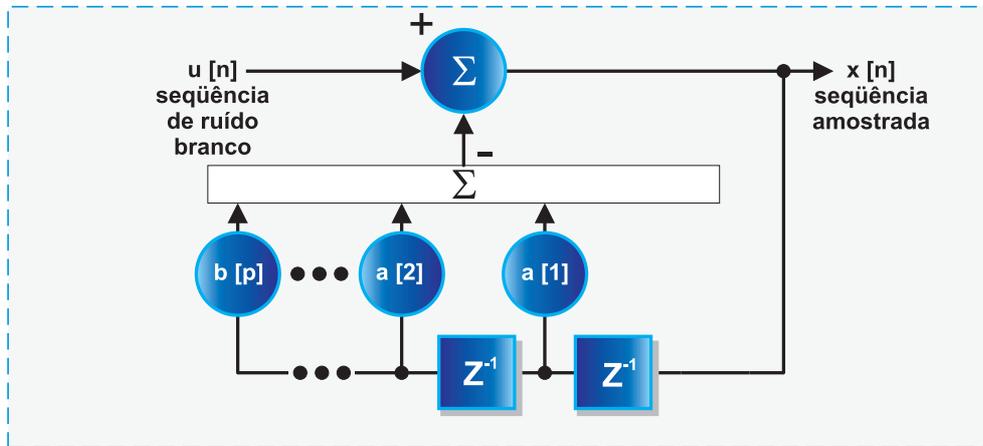


Figura 3.5: Modelo paramétrico AR (adaptado de Marple (1987)).

Neste trabalho, implementou-se apenas os modelos AR e ARMA, pois o objetivo principal é estimar os modos de oscilação do sistema, os quais estão associados basicamente aos pólos da função de transferência. Por essa razão, o modelo MA puro não foi implementado, pois fornece apenas os parâmetros associados aos zeros da função de transferência, conforme pode ser observado na Equação 3.31. A PSD também não foi computada, pois se deseja caracterizar os modos dominantes do sistema não apenas em termos de frequência, mas também em função da taxa de amortecimento. Desta forma, nas seções seguintes apresenta-se apenas a descrição matemática para estimar os parâmetros  $a(n)$  e  $b(n)$  dos modelos AR e ARMA, para posterior obtenção dos pólos do sistema.

### 3.2.1 Estimação dos parâmetros do modelo Auto-Regressivo

Na literatura, existe uma variedade de técnicas de estimação dos parâmetros AR, tais como método de Burg, Yule Walker e Coeficientes de Reflexão (MARPLE, 1987; KAY, 1987). Entretanto, as técnicas mais utilizadas ainda são aquelas baseadas na predição linear, utilizando mínimos quadrados, das quais destacam-se os métodos da Covariância e Autocorrelação (KAY, 1987).

Devido à impossibilidade de analisar todas as possíveis técnicas de estimação de parâmetros AR, optou-se por concentrar os estudos no método de Autocorrelação por ser um método já sedimentado nesse tipo de estudo. Além disso, as estimativas dos parâmetros AR através do método da Covariância não garante que o modelo estimado seja estável (MARPLE, 1987).

O uso do modelo Auto-Regressivo para estimar oscilações eletromecânicas, usando o método da Autocorrelação é sintetizado no fluxograma ilustrado pela Figura 3.6.

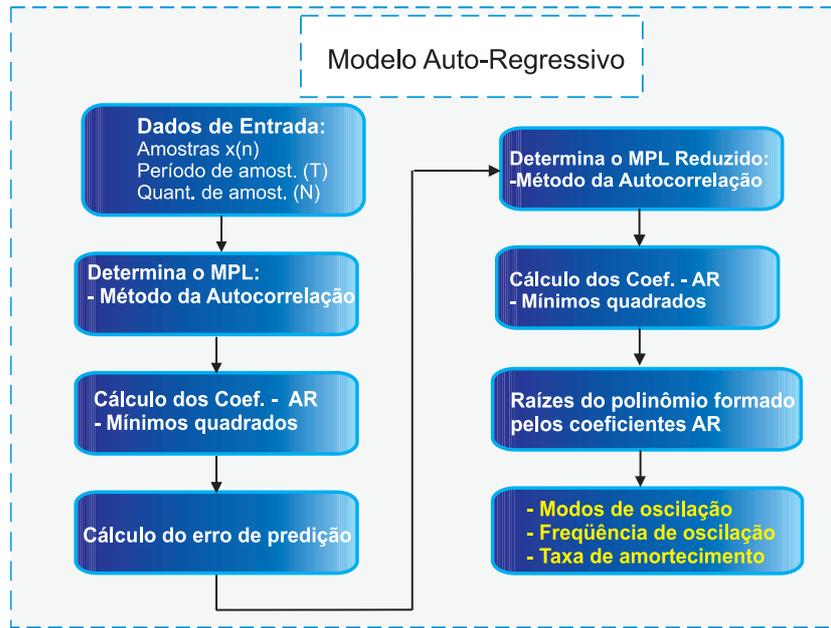


Figura 3.6: Fluxograma - modelo Auto-Regressivo.

As etapas do fluxograma da Figura 3.6, são formalizadas matematicamente a seguir.

### 3.2.2 Método da Autocorrelação

Um preditor linear  $\hat{x}(n)$ , para uma seqüência de dados  $x(1), \dots, x(n)$ , tem a forma

$$\hat{x}(n) = - \sum_{k=1}^p a_p x(k + p), \quad (3.35)$$

onde  $a_p$  são os coeficientes de predição linear e  $p$  é a ordem do preditor linear, cujo erro de predição é dado por:

$$e_p(n) = x(n) - \hat{x}(n), \quad (3.36)$$

Substituindo a Equação 3.35 em 3.36, tem-se

$$e_p(n) = x(n) + \sum_{k=1}^p a_p x(n - k), \quad (3.37)$$

definido para um intervalo  $n = 1$  a  $n = N + p$ . Considerando que  $x(n) = 0$  para

$1 > n > N$  a Equação 3.37 pode ser expandida na forma matricial

$$\begin{pmatrix} e_p^f(1) \\ \vdots \\ e_p^f(p+1) \\ \vdots \\ e_p^f(N-p) \\ \vdots \\ e_p^f(N) \\ \vdots \\ e_p^f(N+p) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} x(1) & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ x(p+1) & \cdots & \cdots & x(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(N-p) & \cdots & \cdots & x(p+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(N) & \cdots & \cdots & x(N-p) \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x(N) \end{pmatrix}}_{X_p} \begin{pmatrix} 1 \\ a_p^f(1) \\ \vdots \\ \vdots \\ a_p^f(N) \end{pmatrix}, \quad (3.38)$$

onde  $X_p$  é uma matriz de dados retangular Toeplitz  $((N+p) \times (p+1))$ . Esta matriz pode ser particionada em:

$$X_p = \begin{pmatrix} y & X \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

onde

$$y = \begin{pmatrix} x(1) \\ \vdots \\ x(N+p) \end{pmatrix} \quad (3.40)$$

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ x(p) & \cdots & \cdots & x(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(N-2p) & \cdots & \cdots & x(p+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(N-1) & \cdots & \cdots & x(N-p) \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x(N) \end{pmatrix} \quad (3.41)$$

Observe-se que  $y$  está associado os elementos da primeira coluna da matriz  $X_p$ ,

enquanto que a matriz  $X$  é formada pelos demais elementos de  $Xp$ .

O objetivo principal dos métodos de predição linear é estimar os coeficientes de predição que minimizam o erro quadrático preditivo, dado por

$$\rho_p^f = \sum_n |e_p^f(n)|^2 \quad (3.42)$$

Estes coeficientes equivalem aos próprios coeficientes de AR, os quais formam o polinômio

$$P_{ar} = \begin{pmatrix} 1 & -a(1) & -a(2) & \cdots & -a(n) \end{pmatrix}, \quad (3.43)$$

cujas raízes fornecem os pólos do sistema.

O intervalo do somatório da Equação (3.42) não é especificado, pois o intervalo selecionado define o tipo de método utilizado. Por exemplo, a diferença entre o método da Autocorrelação de Predição Linear e o da Covariância de Predição Linear reside, justamente, no intervalo de dados selecionado. No caso do intervalo completo,  $e_p^f(1)$  a  $e_p^f(N+p)$ , tem-se o caso do método da Autocorrelação. No caso do intervalo  $e_p^f(p+1)$  a  $e_p^f(N)$ , tem-se o método da Covariância (MARPLE, 1987).

A estimação via predição linear de mínimos quadrados, no caso do método da Autocorrelação pode ser descrita sucintamente como

$$e_p = Xp \begin{pmatrix} 1 \\ a_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ a_p \end{pmatrix} = y + Xa_p \quad (3.44)$$

na qual os elementos do vetores de erros  $e_p$  e dos coeficientes de predição linear  $a_p$  são definidos como:

$$e_p = \begin{pmatrix} e_p(1) \\ \vdots \\ e_p(N+p) \end{pmatrix}, a_p = \begin{pmatrix} a_p(1) \\ \vdots \\ a_p(p) \end{pmatrix} \quad (3.45)$$

e  $Xp$  é a matriz de dados  $(N+p) \times (p+1)$ , dada na Equação 3.38. Desse modo, o erro quadrático de predição para o método da Autocorrelação é dado por:

$$\rho_p = \sum_{n=1}^{N+p} |e_p(n)|^2 = e_p^t e_p = (y + Xa_p)^t (y + Xa_p) \quad (3.46)$$

Expandindo a Equação 3.46, tem-se:

$$\rho_p = y^t y + y^t X a_p + a_p^t X^t y + (a_p^t X^t X a_p) \quad (3.47)$$

Conforme mencionado, o problema proposto é minimizar o erro preditivo quadrático

em relação aos coeficientes de predição. Assim, derivando a equação 3.47 e igualando a zero, obtém-se

$$\frac{d\rho_p}{da_p} = 0 = y^t X + X^t X a_p, \quad (3.48)$$

ou seja,

$$X^t X a_p = -X^t y, \quad (3.49)$$

que representa a Equação Normal de Gauss.

Substituindo a Equação 3.49 em 3.47, o mínimo erro preditivo quadrático será:

$$\rho_{min} = y^t y + y^t X a_p \quad (3.50)$$

As expressões 3.49 e 3.50, podem ser reescritas na forma de um conjunto de equações, dada por:

$$\begin{pmatrix} y^t y & y^t X \\ X^t y & X^t X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ a_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y & X \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} y & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_{min} \\ 0_p \end{pmatrix} \quad (3.51)$$

Então, substituindo a Equação 3.39 em 3.51, tem-se:

$$X_p^t X_p \begin{pmatrix} 1 \\ a_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_{min} \\ 0_p \end{pmatrix}. \quad (3.52)$$

A partir da solução da Equação 3.52, obtém-se os coeficientes de predição que minimizam o erro quadrático de predição. Estes coeficientes equivalem aos próprios coeficientes auto-regressivos, conforme Equação 3.43.

### 3.2.3 Seleção da Ordem do Modelo do Auto-Regressivo

A seleção da ordem do modelo é um problema extremamente importante, porém de difícil solução. Quando é utilizada uma ordem baixa para o modelo, os resultados podem ser deficientes e gerar “vales” no espectro de frequência. Entretanto, ordens elevadas podem provocar “picos” espúrios que, em geral, são estatisticamente instáveis (KAY, 1987).

Os três métodos comumente utilizados na seleção da ordem do modelo AR são: Erro Preditivo Final (FPE - *Finish Prediction Error*), Critério de Informação de Akaike (AIC - *Akaike Information Criterion*) e o Critério da Função de Transferência Autoregressiva (CAT - *Criterion Autoregressive Transfer Function*).

O critério de FEP é baseado no comportamento da potência do erro preditivo em

função da ordem do modelo, o que resulta em uma curva, descrita pela equação 3.53. O mínimo valor dessa curva representa a ordem ótima do modelo.

$$FPE(p) = \left( \frac{N + (p + 1)}{N - (p - 1)} \right) \hat{\rho}_p, \quad (3.53)$$

onde:

$\hat{\rho}_k$ : estimativa da potência do erro preditivo

$p$ : ordem do modelo

$N$ : número de amostras

O critério desenvolvido por Akaike, aborda o problema da determinação da ordem do modelo através de considerações estatísticas sobre a diferença da função densidade de probabilidade estimada em relação à real. O critério AIC é definido pela Equação 3.54:

$$AIC(p) = N \log(\hat{\rho}_p) + 2p \quad (3.54)$$

As expressões 3.55 e 3.56 descrevem o critério de CAT, o qual se baseia na estimativa do mínimo erro quadrático entre o filtro verdadeiro e o estimado para determinar a ordem do modelo (MOREIRA et al., 1998).

$$CAT(p) = \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^p \left( \frac{1}{\tilde{\rho}_j} \right) \right) - \left( \frac{1}{\tilde{\rho}_p} \right), \quad (3.55)$$

onde:

$$\tilde{\rho}_j = \left( \frac{N}{N - j} \right) \hat{\rho}_j \quad (3.56)$$

Além dessas metodologias, existem trabalhos que propõem a identificação através do rank (número de colunas linearmente independentes) da matriz de Hankel. Quando um sinal é livre de ruídos, o posto da matriz de Hankel fornece informações sobre a ordem do modelo (CARDOSO, 2000). No entanto, essa não é uma tarefa fácil, pois na prática os sinais são contaminados por ruídos, fazendo com que a matriz de Hankel se comporte como sendo de posto completo (todas colunas linearmente independentes). Conforme BAZÁN (1993), a forma mais eficaz de tratar esse problema é através do teorema da decomposição em valores singulares (SVD), onde o número de valores singulares é indicativo teórico do posto. Este indicador se mostra teórico porque, na prática, é impossível obter valores singulares exatamente nulos. Dessa forma, o que se faz é determinar o rank e, conseqüentemente, a ordem do modelo, através do número de valores singulares superiores a uma dada tolerância.

### 3.2.4 Estimação dos parâmetros do Modelo Auto-Regressivo de Média Móvel

Ao contrário dos modelos Auto-Regressivos, não existem muitos métodos para se estimarem os parâmetros do modelo Auto-Regressivo de Média Móvel (ARMA). A solução de ARMA nem sempre é uma tarefa muito fácil, devido à natureza não-linear da função de auto-correlação entre a entrada e a saída do modelo (KAY, 1987). Para resolver este problema, normalmente se opta pela solução sub-ótima do problema, utilizando-se modelos lineares (STOICA; MOSES, 1997). Uma classe especial entre esses modelos é a abordagem de identificação entrada-saída. Esta abordagem estima o sinal de entrada  $u(n)$ , supondo-se que este seja um ruído branco. Determinam-se os coeficientes do modelo ARMA através da solução de um conjunto de equações lineares, utilizando-se a teoria dos mínimos quadrados. Com isso, o processo ARMA passa a ser descrito por:

$$x(n) = - \sum_{k=1}^p a(k)x(n-k) + \sum_{k=1}^q b(k)\hat{u}(n-k) + \hat{u}(n), \quad (3.57)$$

definido para um intervalo  $n = 0, 1, \dots, N-1$ . A expressão 3.57 pode ser apresentada ainda na forma matricial

$$\mathbf{x} = H\theta + \hat{\mathbf{u}}, \quad (3.58)$$

onde

$$x(n) = \left( x(0) \quad x(1) \quad \cdots \quad x(N-1) \right)^t \quad (3.59)$$

$$\hat{u}(n) = \left( \hat{u}(0) \quad \hat{u}(1) \quad \cdots \quad \hat{u}(N-1) \right)^t \quad (3.60)$$

$$\theta = \left( -a(1) \quad -a(2) \quad \cdots \quad -a(p) \quad \cdots \quad b(1) \quad b(2) \quad \cdots \quad b(q) \right)^t \quad (3.61)$$

$$H = \begin{pmatrix} x(-1) & x(-2) & \cdots & x(-p) & \hat{u}(-1) & \hat{u}(-2) & \cdots & \hat{u}(-q) \\ x(0) & x(-1) & \cdots & x(-p+1) & \hat{u}(0) & \hat{u}(-1) & \cdots & \hat{u}(-q+1) \\ \vdots & \vdots \\ x(N-2) & x(N-3) & \cdots & x(N-p-1) & \hat{u}(N-2) & \hat{u}(N-3) & \cdots & \hat{u}(N-q-1) \end{pmatrix} \quad (3.62)$$

A matriz H tem dimensão  $N \times (p+q)$ , sendo que os elementos com índices  $n < 0$  são nulos.

A solução da Equação 3.58 por mínimos quadrados, utilizando o mesmo processo

de minimização adotado no modelo AR, é dada por

$$\hat{\theta} = (H^t H)^{-1} H^t \mathbf{x}, \tag{3.63}$$

onde o vetor  $\hat{\theta}$  fornece as estimativas dos coeficientes de autoregressão  $a(n)$  e média móvel  $b(n)$ . Para determinação dos modos de oscilação são utilizados apenas os coeficientes  $a(n)$ .

O processo para estimação de oscilações eletromecânicas através do modelo ARMA é sintetizado no fluxograma apresentado pela Figura 3.7.

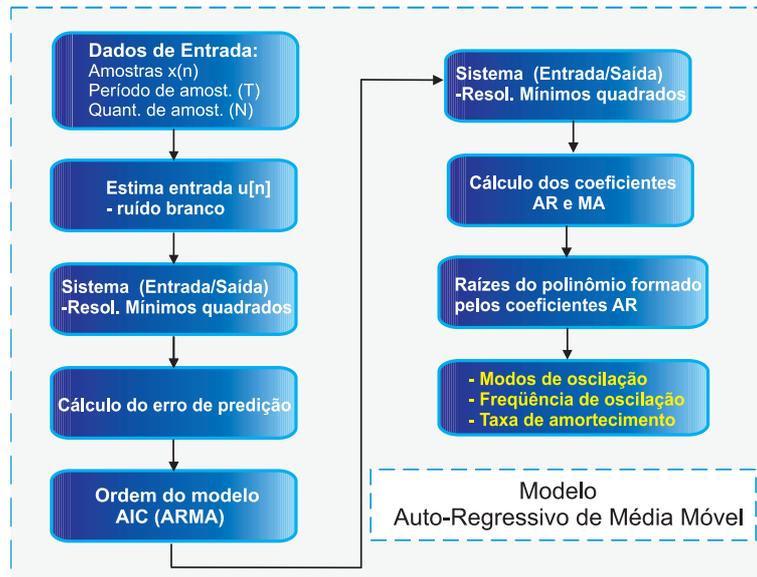


Figura 3.7: Fluxograma - Modelo Auto-Regressivo de Média Móvel.

### 3.2.5 Seleção da Ordem do Modelo do Auto-Regressivo de Média Móvel

A seleção da ordem para parcelas AR e MA (do modelo ARMA) não é um procedimento simples. Além disso, não existem muitos critérios de seleção de ordem, citados na literatura, para este tipo de modelo. O critério que tem sido normalmente utilizado é o AIC (Critério de Informação de Akaike) para o modelo ARMA, dado por (MARPLE, 1987):

$$AIC(p, q) = N \log(\hat{\rho}_{pq} + 2(p + q)), \tag{3.64}$$

onde  $\hat{\rho}_{pq}$  é a estimativa da variância do ruído branco, assumido como sinal de entrada no modelo ARMA, o qual está associado ao próprio erro de predição.

### 3.3 Metodologia Proposta

A metodologia proposta neste trabalho para extrair informações acerca do desempenho dinâmico de SEE, a partir do monitoramento de SPMS, é ilustrada no fluxograma da figura 3.8.

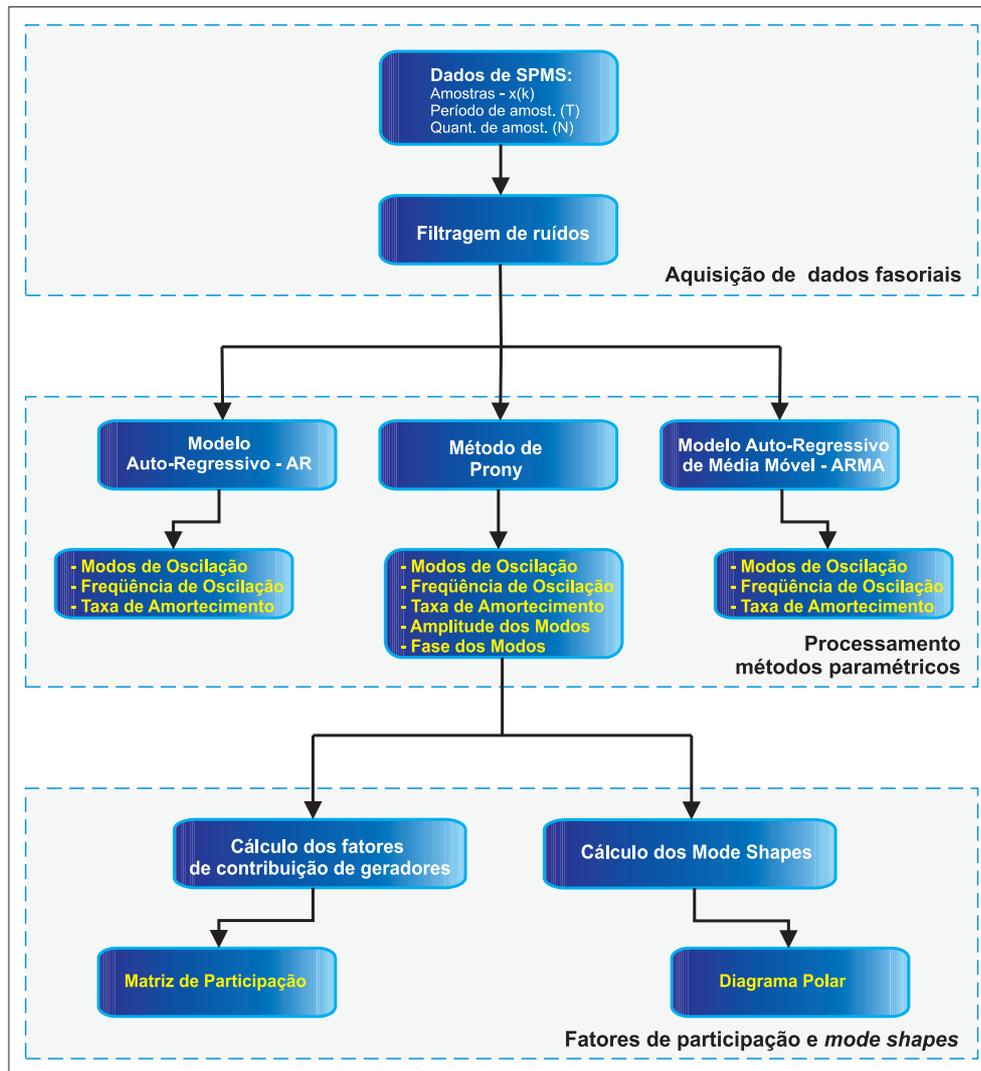


Figura 3.8: Fluxograma para análise da dinâmica de SEE via métodos paramétricos.

Na primeira etapa é realizada aquisição dos dados de monitoramento do SPMS, os quais são filtrados através de filtro passa-baixa para eliminar os efeitos dos transitórios eletromagnéticos e os ruídos no sinal. Na segunda etapa, os dados de SPMS são processados através dos modelos AR e ARMA e pelo método de Prony, sendo possível comparar os resultados obtidos em termos de frequência de oscilação e taxa de amortecimento. Observa-se que, enquanto os modelos AR e ARMA fornecem somente informações de frequência e taxa de amortecimento, o método de Prony fornece

também as amplitudes e fases dos modos de oscilação. Na terceira etapa, são calculadas os fatores de contribuição, por barra de geração, nos modos de oscilação. Para realizar essa análise são necessárias, além do modo de oscilação, informações acerca da amplitude e fase dos modos eletromecânicos. Por esta razão, a análise da contribuição das barras de geração se restringe ao uso do método de Prony. Os resultados dessa análise são apresentados na forma de matriz de participação e histograma. Ainda na terceira etapa, determinam-se os *mode shapes*, utilizando-se também informações de amplitude e fase dos modos. Neste caso, os resultados de *modes shapes* são disponibilizados na forma de diagrama de fasores. A descrição da metodologia para a obtenção dos fatores de participação e *mode shapes*, via método de Prony, é apresentada a seguir.

### 3.3.1 Estimação de fatores de participação e *mode shapes* via método de Prony

O objetivo desta seção é descrever a abordagem para o cálculo de fatores de participação e *mode shapes*, a partir dos dados de monitoramento de SPMS e de parâmetros estimados através do método de Prony.

A análise de fatores de participação é utilizada para identificar a contribuição de cada variável de estado do sistema nos modos de oscilação. Essas informações são muito úteis para construção de modelos reduzidos do sistema e na definição de estratégias de controle (SAUER; PAI, 1998). Entretanto, em virtude da impossibilidade de monitorar todas as variáveis de estado do sistema, propõe-se, neste trabalho, o cálculo de fatores de participação apenas das variáveis de estados possíveis de serem monitoradas. No caso da medição fasorial, a variável de estado de interesse está relacionada à frequência. A seguir, apresenta-se uma breve revisão sobre o cálculo de fatores de participação e, em seguida, descreve-se a abordagem proposta, utilizando o método de Prony.

#### Revisão sobre cálculo de fatores de participação

Os fatores de participação são determinados a partir de um modelo linear do sistema, com parâmetros invariantes no tempo, dado por:

$$\dot{x} = Ax, \quad (3.65)$$

onde  $A$  tem dimensão  $(n \times n)$  e representa a matriz de coeficientes do sistema. Os fatores de participação representam a medida de sensibilidade dos modos de oscilação<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Os modos de oscilação correspondem ao par de autovalores conjugado complexo,  $\alpha \pm iw$  (ROGERS, 2000).

$(\lambda_i)$ , em relação aos elementos da diagonal principal da matriz  $(a_{kk})$ , definidos como (SAUER; PAI, 1998):

$$p_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}}; \quad \begin{array}{l} k = 1, \dots, n \\ i = 1, \dots, n \end{array} \quad (3.66)$$

Outra forma de se obter os fatores de participação é:

$$p_{ki} = \frac{w_{ki}v_{ik}}{w_i^t v_i}, \quad (3.67)$$

onde  $w$ ,  $v$  são os autovetores à esquerda e à direita associados à matriz  $A$ , respectivamente. A equivalência entre as Equações 3.66 e 3.67, é obtida considerando-se as seguintes relações (SAUER; PAI, 1998):

$$Av_i = \lambda_i v_i \quad (3.68)$$

$$w_i^t A = w_i^t \lambda_i \quad (3.69)$$

$$(A - \lambda_i I)v_i = 0 \quad (3.70)$$

$$w_i^t (A - \lambda_i I) = 0 \quad (3.71)$$

Assim, assumindo-se que os autovalores e os autovetores variam conforme os respectivos elementos da matriz  $A$ , então uma pequena variação na Equação 3.68 pode ser representada como:

$$(A + \Delta A)(v_i + \Delta v_i) = (\lambda_i + \Delta \lambda_i)(v_i + \Delta v_i), \quad (3.72)$$

ou, ainda, na forma expandida:

$$(Av_i) + (\Delta Av_i + A\Delta v_i) + (\Delta A\Delta v_i) = (\lambda_i v_i) + (\Delta \lambda_i v_i) + (\lambda_i \Delta v_i) + (\Delta \lambda_i \Delta v_i) \quad (3.73)$$

Se os elementos de segunda ordem  $(\Delta A\Delta v_i$  e  $\Delta \lambda_i \Delta v_i)$  da Equação 3.73 forem desconsiderados e a equação for multiplicada por  $w_i^t$ , obtém-se:

$$\underbrace{w_i^t [A - \lambda_i I]}_a \Delta v_i + w_i^t \Delta Av_i = w_i^t \Delta \lambda_i v_i \quad (3.74)$$

Na equação 3.71, verifica-se que parcela  $a$  é nula, assim tem-se:

$$w_i^t \Delta Av_i = w_i^t \Delta \lambda_i v_i \quad (3.75)$$

Como os fatores de participação estão associados somente aos elementos da diagonal principal da matriz  $A$ , considera-se uma variação apenas nos elementos  $a_{kk}$ , obtendo-se:

$$w_i^t \Delta A v_i = w_{ki}^t \Delta a_{kk} v_{ik} = w_i^t \Delta \lambda_i v_i \quad (3.76)$$

Dessa forma, tem-se:

$$\frac{\Delta \lambda_i}{\Delta a_{kk}} = \frac{w_{ki} v_{ik}}{w_i^t v_i} = p_{ki}, \quad \begin{matrix} k = 1, \dots, n \\ i = 1, \dots, n \end{matrix}, \quad (3.77)$$

ou seja, verifica-se a equivalência entre as Equações 3.66 e 3.67.

Geralmente, os autovetores podem ser complexos, assim a formulação genérica para cálculo de fatores de participação é dada por (SAUER; PAI, 1998):

$$p_{ki} = \frac{|w_{ki}| |v_{ik}|}{\sum |w_i^t| |v_i|}; \quad \begin{matrix} k = 1, \dots, n \\ i = 1, \dots, n \end{matrix} \quad (3.78)$$

### Uso do método de Prony para a estimação de fatores de participação

A estimação de fatores de participação, através do método de Prony, visa identificar a contribuição somente daquelas variáveis de estado passíveis de serem monitoradas, ao invés da abordagem descrita anteriormente, que parte de um modelo matemático linear para identificar como as diversas variáveis de estado contribuem em um dado modo de oscilação. Para isso, utilizam-se dados de monitoramento da medição fasorial sincronizada e o método de Prony para estimar os modos de oscilação do sistema e a sua amplitude nas barras de interesse.

Inicialmente, supõe-se um sistema linear invariante no tempo, sujeito a uma perturbação a partir da condição inicial  $x(0) = x_0$ . Retirada a perturbação, a resposta dinâmica do sistema autônomo (sistema livre) irá se comportar de acordo com a Equação 3.65, cuja solução é dada por (MARINI, 2005):

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \underbrace{(w_i^t x_0)}_{\Gamma} v_i e^{(\alpha_i \pm j 2\pi f_i)t} \quad (3.79)$$

Observa-se que a parcela  $w_i^t x_0$  é um escalar, assim a distribuição da resposta modal entre os componentes de  $x$  é determinada inteiramente pelos autovetores à direita,  $v_i$ . Na Equação 3.79, a parcela “ $\Gamma$ ” equivale aos coeficientes complexos  $h_i$ , estimados através do método de Prony.

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p \underbrace{\frac{A_i}{2}}_{h_i} e^{\pm j\phi_i} e^{(\alpha_i \pm j2\pi f_i)(n-1)T}, \quad n = 1, \dots, N. \quad (3.80)$$

Assumindo-se que seja realizada a análise de Prony em relação à resposta do sistema, monitorada em cada barra de forma sincronizada, é possível estimar a parcela “Γ” da Equação 3.79. Essa parcela equivale aos próprios autovetores à direita multiplicados por um escalar complexo, associado às condições iniciais. O módulo e fase deste escalar complexo varia de acordo com a condição inicial. Nota-se, por hipótese, que para  $v_i$  ser o autovetor à direita da matriz  $A$  é necessário que este satisfaça a Equação 3.68. Assim, assumindo que  $v_i$  seja multiplicado por um escalar  $x \in \mathbb{C} \neq 0$ , tem-se (STRANG, 1988):

$$\begin{aligned} (Av_i) x &= (\lambda_i v_i) x \\ (Av_i) x &= \lambda_i (v_i x) \\ A(v_i x) &= \lambda_i (v_i x), \end{aligned} \quad (3.81)$$

ou seja,  $v_i x$  é autovetor à direita da matriz  $A$ .

Considerando-se que, além dos modos de oscilação, é possível estimar-se os autovetores à direita, então é possível obter-se a matriz reduzida  $A$ , associada à variável de estado monitorada, utilizando-se a Equação 3.68. Para que esta equação possa ser utilizada é necessário que o número de modos analisados seja igual ao número de barras, e que a matriz formada pelos vetores  $v_i$  admita inversa. Essa formulação é detalhada no exemplo a seguir.

### Exemplo numérico de fatores de participação via método de Prony

Considerando que a matriz

$$A = \begin{pmatrix} -0,1005 & 1,0939 & 2,0428 & 4,4599 \\ -1,0880 & -0,1444 & 5,9859 & -3,0481 \\ -2,0510 & -5,9709 & -0,1387 & 1,9229 \\ -4,4575 & 3,0753 & -1,8847 & -0,1160 \end{pmatrix} \quad (3.82)$$

seja uma matriz reduzida  $A$  do sistema, a resposta livre terá o comportamento descrito pela Figura 3.9.

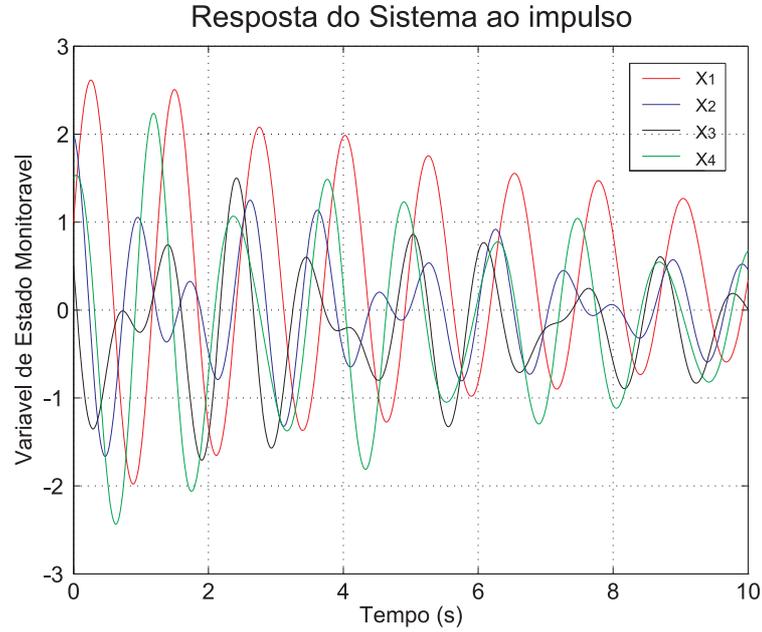


Figura 3.9: Resposta do sistema ao impulso.

Os autovalores e autovetores da matriz A são dados por:

$$\lambda = \begin{pmatrix} -0,0998 - 5,0000i \\ -0,0998 + 5,0000i \\ -0,1500 + 7,0000i \\ -0,1500 - 7,0000i \end{pmatrix} \quad (3.83)$$

$$v = \begin{pmatrix} -0,7033 & -0,7033 & 0,0442 - 0,0589i & 0,0442 + 0,0589i \\ -0,0419 - 0,2332i & -0,0419 + 0,2332i & -0,6662 & -0,6662 \\ 0,0582 - 0,3317i & 0,0582 + 0,3317i & 0,1125 - 0,6115i & 0,1125 + 0,6115i \\ -0,0165 - 0,5793i & -0,0165 + 0,5793i & 0,2038 + 0,3501i & 0,2038 - 0,3501i \end{pmatrix} \quad (3.84)$$

$$w = \begin{pmatrix} -0,7033 & -0,7033 & -0,0442 - 0,0588i & -0,0442 + 0,0588i \\ -0,0419 + 0,2332i & -0,0419 - 0,2332i & 0,6662 & 0,6662 \\ 0,0583 + 0,3317i & 0,0583 - 0,3317i & -0,1124 - 0,6115i & -0,1124 + 0,6115i \\ -0,0165 + 0,5793i & -0,0165 - 0,5793i & -0,2038 + 0,3502i & -0,2038 - 0,3502i \end{pmatrix} \quad (3.85)$$

Os autovetores à direita e à esquerda relacionam os autovalores ( $\lambda$ ) e as variáveis de estado ( $x$ ) da matriz, segundo a disposição apresentada na Equação 3.86.

$$\begin{array}{c|cccc}
 & \lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_n \\
 \hline
 x_1 & v_{11}, w_{11} & v_{12}, w_{12} & \cdots & v_{1n}, w_{1n} \\
 x_2 & v_{21}, w_{21} & v_{22}, w_{22} & \cdots & v_{2n}, w_{2n} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\
 x_n & v_{n1}, w_{n1} & v_{n2}, w_{n2} & \cdots & v_{nn}, w_{nn}
 \end{array} \tag{3.86}$$

Assumindo-se que as variáveis de estado ( $x_1, x_2, x_3$  e  $x_4$ ), referentes a resposta temporal apresentada na Figura 3.9, estejam associadas as freqüência em quatro barras do sistema, e admitindo-se ainda que essa resposta possa ser monitorada através do SPMS, de forma sincronizada, é possível aplicar o método de Prony para estimar os modos de oscilação  $\lambda_i$  e os coeficientes complexos  $h_i = A_i \angle \phi_i$ , em cada barra do sistema. Assim, aplicando o método de Prony para a resposta associada à barra 1, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Modos de oscilação barra 1.

Modos	Autovalores ( $\hat{\lambda}$ )	$\hat{f}$ (Hz)	$\hat{\xi}$ (%)	$\hat{A}$	$\hat{\phi}$ (graus)
1	-0,0998 -5,0000i	-0,7958	1,9965	1,1057	161,1897
	-0,0998 5,0000i	0,7958	1,9965	1,1057	-161,1897
2	-0,1500 7,0000i	1,1141	2,1417	0,0567	152,8245
	-0,1500 -7,0000i	-1,1141	2,1417	0,0567	-152,8245

Nota-se que os autovalores estimados são exatamente os autovalores da matriz reduzida A (Equação 3.83). Tais modos de oscilação estão presentes também nas demais barras do sistema, porém com diferentes amplitudes e fases. Ao aplicar o método de Prony para as demais barras, obtém-se a matriz de coeficiente complexos  $h_i$ , dada na Equação 3.87.

$$\hat{v} = \begin{pmatrix} -1,0467 + 0,3565i & -1,0467 - 0,3565i & -0,0505 + 0,0259i & -0,0505 - 0,0259i \\ 0,0558 + 0,3682i & 0,0558 - 0,3682i & 0,4617 + 0,2245i & 0,4617 - 0,2245i \\ 0,2548 + 0,4642i & 0,2548 - 0,4642i & -0,2840 + 0,3859i & -0,2840 - 0,3859i \\ 0,2691 + 0,8705i & 0,2691 - 0,8705i & -0,0233 - 0,3113i & -0,0233 + 0,3113i \end{pmatrix} \tag{3.87}$$

Estas amplitudes complexas são os próprios autovetores à direita da Equação 3.84, multiplicado por um escalar complexo. Este efeito pode ser observado no diagrama polar apresentado na Figura 3.10.

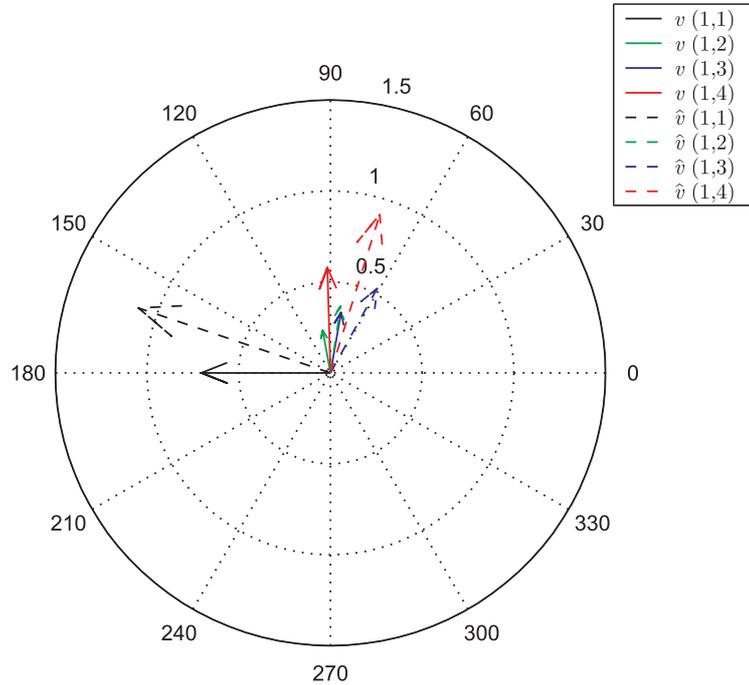


Figura 3.10: Comparação dos autovetores à direita e coeficiente  $h_i$ .

Nota-se na Figura 3.10, que os autovetores à direita estimados ( $\hat{v}$ ) sofrem um deslocamento angular e um ganho de módulo. Tal característica está associada as condições iniciais do sistema. Para se obter este deslocamento angular e ganho de módulo (escalar complexo) basta dividir  $\hat{v}_{(1,1)}$  por  $v_{(1,1)}$ .

Utilizando a expressão 3.68, para estimar a matriz reduzida  $\hat{A}$ , tem-se:

$$\hat{A} = \hat{v} \Lambda \hat{\lambda}(\hat{v})^{-1}, \tag{3.88}$$

onde  $\Lambda \hat{\lambda}$  é uma matriz diagonal formada por  $\{\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \dots, \hat{\lambda}_n\}$ . Desse modo, obtém-se:

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} -0,1005 & 1,0941 & 2,0423 & 4,4605 \\ -1,0877 & -0,1445 & 5,9859 & -3,0481 \\ -2,0509 & -5,9712 & -0,1389 & 1,9229 \\ -4,4572 & 3,0747 & -1,8845 & -0,1157 \end{pmatrix} \tag{3.89}$$

Observa-se que os valores estimados da matriz reduzida  $\hat{A}$  são muito próximos aos da Equação 3.82, comprovando-se que as amplitudes complexas dos modos, estimadas pelo método de Prony, são os próprios autovetores à direita. A partir da estimativa da matriz reduzida  $\hat{A}$  é possível estimar-se os autovetores à esquerda e, então, determinar

os fatores de participação, através da equação

$$P_{ki} = \frac{|w_{ik}| |v_{ki}|}{\sum_{k=1}^n |w_{ik}| |v_{ki}|}, \quad (3.90)$$

onde  $k$  é o índice associado às barras do sistema e  $i$  aos modos de oscilação. Calculando-se os fatores de participação para o exemplo proposto, obtém-se a matriz de participação, dada por:

$$P = \begin{pmatrix} 0,4946 & 0,4946 & 0,0054 & 0,0054 \\ 0,0561 & 0,0561 & 0,4438 & 0,4438 \\ 0,1134 & 0,1134 & 0,3866 & 0,3866 \\ 0,3358 & 0,3358 & 0,1641 & 0,1641 \end{pmatrix} \quad (3.91)$$

Os resultados dos fatores de participação podem ser apresentados ainda na forma de histograma, conforme Figura 3.11.

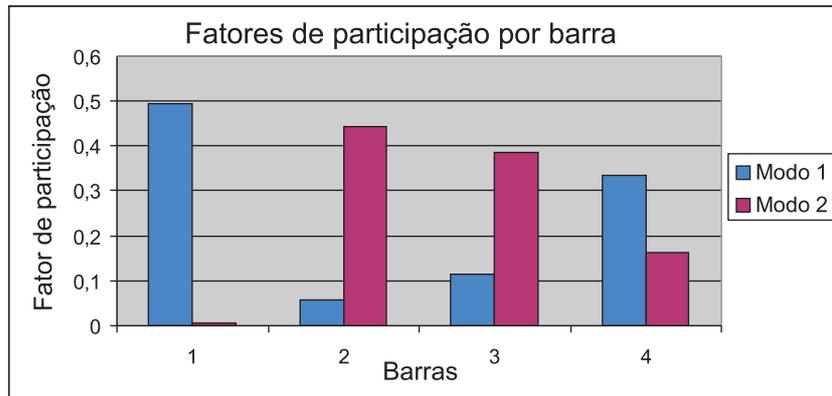


Figura 3.11: Fatores de participação por barras de geração.

Nota-se que o modo de oscilação 1 ( $\lambda_1 = -0,0998 \pm 5,0000i$ ) está mais associado às barras 1 e 4, enquanto que o modo 2 ( $\lambda_2 = -0,1500 \pm 7,0000i$ ) está predominantemente associado às barras 2 e 3.

### Uso do método de Prony para estimação de *mode shapes*

Os *mode shapes* são os próprios autovetores à direita, associados à matriz  $A$ , os quais descrevem a forma como os modos de oscilação se distribuem entre as variáveis de estado (KUNDUR, 1994). Assim, conforme constatado, usando-se o método de Prony e dados de SPMS, é possível estimar o autovetor à direita. Portanto é possível estimar os *mode shapes*. Assim, baseados nos dados da equação 3.87, obteve-se os *mode shapes* do exemplo anterior, ilustrados na Figura 3.12.

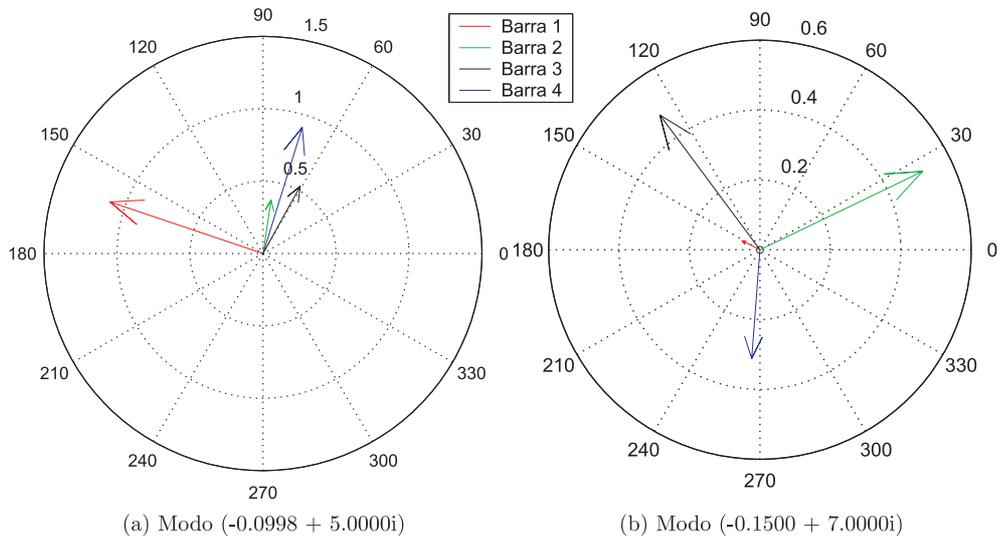


Figura 3.12: *Mode shapes* - exemplo numérico.

Percebe-se, na Figura 3.12 (a), que o modo  $-0,0998 \pm 5,0000i$  está associado às supostas barras de geração 2, 3 e 4, oscilando em relação à barra 1. Na Figura 3.12 (b), nota-se a fraca interação da barra 1 com o modo  $-0,1500 \pm 7,0000i$ , o que não ocorre com as barras 2,3 e 4, que contribuem significativamente.

### 3.4 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados e discutidos o método de Prony e os modelos Auto-Regressivo (AR - *Autoregressive*) e Auto-Regressivo de Média Móvel (ARMA - *Autoregressive Moving Average*), aplicados à identificação e caracterização de oscilações eletromecânicas.

Apresentou-se uma abordagem para a obtenção de fatores de participação por barras de geração e *mode shapes*, bem como a metodologia adotada para realizar a análise do comportamento dinâmico de SEE, a partir de dados de medição fasorial sincronizada. Apresentou-se também um exemplo número para a melhor compreensão da metodologia proposta.

Constatou-se que a partir da análise de Prony em relação à resposta temporal do sistema, monitorada em cada barra de forma sincronizada, é possível estimar os autovetores à direita. Tais informações, associadas às estimativas dos autovalores tornam possível reconstruir a matriz reduzida  $A$  do sistema e, desta forma, obterem-se os fatores de participação.

# Capítulo 4

## Experimentos Computacionais

Neste capítulo são apresentados resultados computacionais, visando a validação da metodologia desenvolvida. Estes resultados, são apresentados em duas etapas: simulações e estudos de caso. A etapa de simulações tem o objetivo de analisar a precisão dos resultados, os critérios de seleção de ordem e o efeito dos ruídos nos parâmetros estimados. A etapa seguinte, estudos de caso, traz alguns resultados da aplicação do método para analisar distúrbios ocorridos no Sistema Interligado Nacional (SIN), baseando-se em registros do protótipo de sistema de medição fasorial sincronizada do Projeto MedFasee.

### 4.1 Estudos de simulação

Nas simulações, são utilizados o programa Matlab para implementação dos métodos paramétricos e o *software* PacDyn<sup>1</sup> para a obtenção da resposta temporal dos sistemas teste, bem como os modos de oscilação eletromecânicos, os fatores de participação e os *mode shapes*, com o objetivo de avaliar a metodologia desenvolvida. Para realizar essa avaliação são adotados os seguintes critérios:

- tempo de simulação: 10 seg;
- número de amostras: 600;
- desconsiderado o efeito de *off-sets* (componentes DCs) nas amostras;
- desconsiderados os modos de oscilação com taxas de amortecimento superiores a 80%;

---

<sup>1</sup>O PadDyn é um programa de análise de estabilidade para pequenas perturbações, desenvolvido pelo CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

- uso de um filtro passa-baixa, com frequência de corte de  $5Hz$ , para eliminar os efeitos dos transitórios eletromagnéticos;
- taxa de amostragem de 60 fasores por segundo, compatível com a utilizada no protótipo MedFasee.

Para representar o efeito de ruídos no sinal de entrada, utilizou-se o modelo ruído branco gaussiano, geralmente empregado em estudos de oscilações eletromecânicas (XIAO et al., 2004; TRUDNOWSKI; DONNELLY; HAUER, 1994). Para simular esse tipo de ruído, foi gerado um vetor ( $\mathbf{r}$ ) de variáveis aleatórias, com distribuição uniforme e média zero. A relação entre a energia do sinal e o ruído (SNR - *Signal Noise Ratio*) é geralmente utilizada para quantificar o nível de ruído presente em um sinal. Esta relação é dada por:

$$SNR(dB) = 20 \log \left( \frac{\left( \frac{\sum_k^N (\mathbf{s}_k^2)}{N} \right)}{\sigma(\mathbf{r})^2} \right) \quad (4.1)$$

onde:

- $\mathbf{s}$ : vetor do sinal de entrada;
- $\mathbf{r}$ : vetor do ruído branco gaussiano;
- $\sigma$ : desvio padrão;
- $N$ : número de amostras.

Conforme pode ser observado na Equação 4.1, a energia do ruído é a própria variância ( $\sigma^2$ ) do vetor  $\mathbf{r}$ , sendo a função de distribuição de probabilidade (fdp) uniforme, dada por:

$$fdp = \begin{cases} \frac{1}{a-b} & , \text{ se } a < x < b \\ 0 & , \text{ para os demais pontos,} \end{cases} \quad (4.2)$$

na qual  $x$  é a variável aleatória e  $a, b$  os limites do intervalo de interesse. A variância da fdp é obtida por:

$$\sigma(x)^2 = \left( \frac{b-a}{12} \right) \quad (4.3)$$

Baseado em outros estudos de natureza semelhante ao apresentado neste trabalho, adotou-se uma SNR de 39dB (XIAO et al., 2004; TRUDNOWSKI; DONNELLY; HAUER, 1994).

### 4.1.1 Sistema Equivalente Brasileiro Sul Sudeste Modificado

Na Figura 4.1 é apresentado Sistema Equivalente Brasileiro Sul Sudeste Modificado de 7 barras e 5 máquinas, proposto em Martins (1989). Os dados deste sistema são apresentados no Apêndice A.

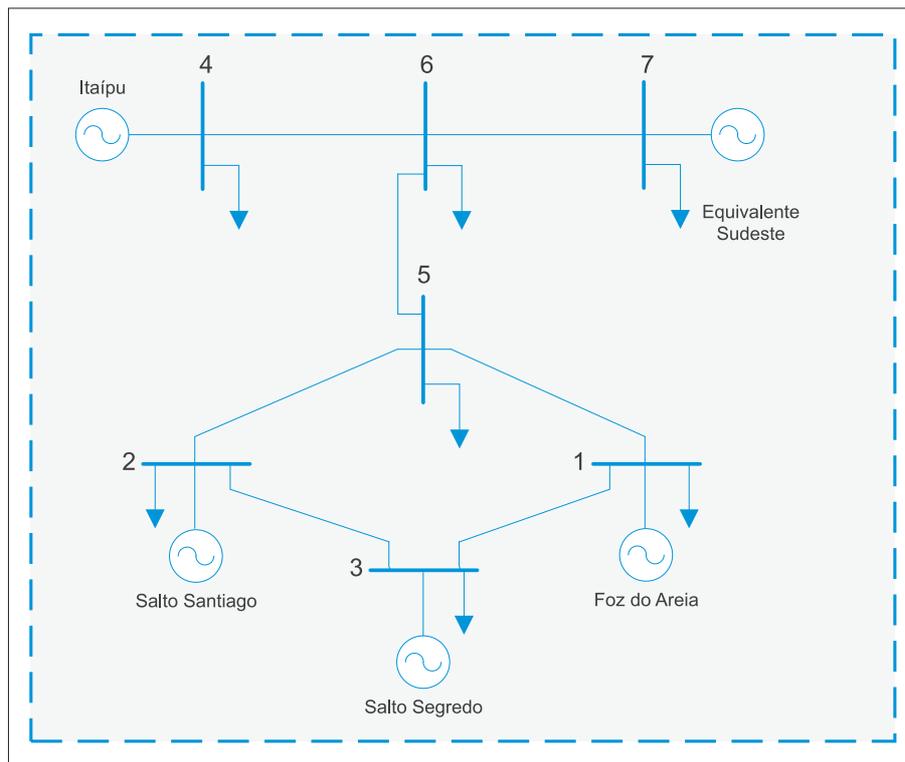


Figura 4.1: Configuração do Sistema Equivalente Brasileiro Sul Sudeste Modificado.

No sistema proposto por Martins (1989), não são modelados os reguladores de velocidade, o que implica na redução ou no aumento da frequência em regime permanente. A fim de evitar esse efeito, adotou-se o sistema equivalente sudeste como barra de referência. Obteve-se, desta forma, o comportamento da frequência pós-distúrbio (degrau de potência mecânica em Foz do Areia) em todas as barras do sistema, apresentado na Figura 4.2.

Esta resposta temporal foi gerada através do *software* Matlab, utilizando informações da matriz de espaço de estado do sistema, à qual foi exportada do *software* PacDyn, baseado no modelo linear do sistema. As amostras dessas curvas, considerando um período de amostragem de 0,0167 segundos, são utilizadas como dados de entrada nos modelos paramétricos para realizar a análise espectral e identificar os modos de oscilação do sistema.

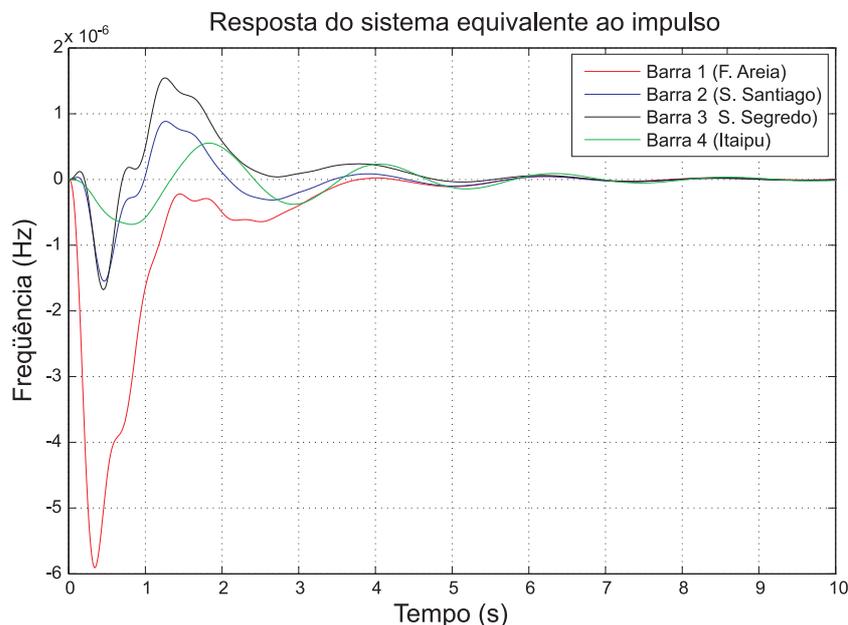


Figura 4.2: Desvio de frequência pós-distúrbio.

### Resultados do *Software* PacDyn

Para comparar os resultados obtidos através dos modelos paramétricos foram realizadas simulações utilizando-se o *software* PacDyn. A identificação de modos de oscilação, obtida através deste software, é apresentada na Figura 4.3.

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)	Part. Factor
1	-0.4187	2.7653	2.7968	0.4401	14.971	DELT ITAIPU # 4 0
2	-0.4187	-2.7653	2.7968	-0.4401	14.971	
3	-1.2108	12.313	12.372	1.9596	9.7863	WW ITAIPU # 4 0
4	-1.2108	-12.313	12.372	-1.9596	9.7863	
5	-1.7675	13.905	14.017	2.2130	12.610	WW S Santiago # 2 0
6	-1.7675	-13.905	14.017	-2.2130	12.610	
7	-1.8499	13.873	13.996	2.2080	13.218	WW S Segredo # 3 0
8	-1.8499	-13.873	13.996	-2.2080	13.218	
9	-1.8202	11.288	11.433	1.7965	15.920	EQ' S Segredo # 3 0
10	-1.8202	-11.288	11.433	-1.7965	15.920	
11	-1.3614	3.4491	3.7080	0.5489	36.713	DELT S Segredo # 3 0
12	-1.3614	-3.4491	3.7080	-0.5489	36.713	
13	-4.7081	3.4320	5.8262	0.5462	80.809	VPSS PSSW # 2 VPSS
14	-4.7081	-3.4320	5.8262	-0.5462	80.809	
15	-4.9894	3.5247	6.1088	0.5610	81.675	X5 PSSW # 3 X5
16	-4.9894	-3.5247	6.1088	-0.5610	81.675	
17	-27.670	11.708	30.045	1.8634	92.095	EFD ITAIPU # 4 0
18	-27.670	-11.708	30.045	-1.8634	92.095	
19	-29.320	12.187	31.752	1.9397	92.340	EQ' FOZ AREIA # 1 0
20	-29.320	-12.187	31.752	-1.9397	92.340	
21	-29.426	11.486	31.588	1.8280	93.155	EQ' S Santiago # 2 0
22	-29.426	-11.486	31.588	-1.8280	93.155	
23	-26.990	9.3278	28.557	1.4846	94.515	EFD S Segredo # 3 0
24	-26.990	-9.3278	28.557	-1.4846	94.515	
25	-30.773	0.	30.773	0.	100.00	ED' S Segredo # 3 0
26	-22.418	0.	22.418	0.	100.00	ED' S Santiago # 2 0
27	-11.999	0.	11.999	0.	100.00	ED' FOZ AREIA # 1 0
28	-7.1034	0.	7.1034	0.	100.00	ED' ITAIPU # 4 0
29	-6.0578	0.	6.0578	0.	100.00	X3 PSSW # 3 X3
30	-3.7383	0.	3.7383	0.	100.00	X3 PSSW # 4 X3
31	-1.2993	0.	1.2993	0.	100.00	EQ' S Santiago # 2 0
32	-0.6248	0.	0.6248	0.	100.00	EQ' S Segredo # 3 0

Figura 4.3: Modos de oscilação do sistema equivalente - *software* PacDyn.

Neste caso, o modo de oscilação dominante identificado é  $-0,4187 \pm 2,7653i$ , com frequência de oscilação de  $0,4401 Hz$  e taxa de amortecimento de  $14,971\%$ .

### Estimativa de Freqüência e Taxa de Amortecimento

Inicialmente, as estimativas dos modos de oscilação são realizadas desconsiderando a presença de ruídos no sinal de entrada. Num segundo momento, a fim de verificar os efeitos de ruídos nas estimativas de freqüência e taxa de amortecimento, realizam-se simulações considerando uma SNR de 39dB no sinal de entrada, valor adotado em Xiao et al. (2004). Na tabela 4.1, são apresentados os resultados obtidos em condições ideais, ou seja, na ausência de ruídos no sinal de entrada

Tabela 4.1: Estimativa do modo de oscilação dominante sem ruído.

Técnicas (ordem)	Autovalores ( $\lambda$ )	$f$ (Hz)	$\xi$ (%)
PacDyn	$-0,4187 \pm 2,7653i$	0,4401	14,971
Prony (40)	$-0,4015 \pm 2,8034i$	0,4462	14,178
AR (61)	$-0,3386 \pm 3,0070i$	0,4786	11,190
ARMA (60,60)	$-0,3042 \pm 2,9620i$	0,4714	10,216

Observa-se na Tabela 4.1, que a ordem dos modelos é diferente. Tal diferença se deve as particularidades de cada técnica e correspondentes critérios de seleção de ordem.

Nota-se que os modelos AR e ARMA apresentam resultados semelhantes, porém as estimativas de freqüência e taxa de amortecimento, utilizando o método de Prony, mostram-se mais coerentes com as obtidas através do *software* PacDyn.

Na Tabela 4.2, são apresentados os resultados obtidos considerando-se a presença de ruído no sinal de entrada.

Tabela 4.2: Estimativa do modo de oscilação dominante com SNR de 39dB.

Técnicas (ordem)	Autovalores ( $\lambda$ )	$f$ (Hz)	$\xi$ (%)
PacDyn	$-0,4187 \pm 2,7653i$	0,4401	14,971
Prony (116)	$-0,3839 \pm 2,9103i$	0,4632	13,076
AR (65)	$-0,3062 \pm 2,9275i$	0,4659	10,402
ARMA (60,60)	$-0,2970 \pm 2,9597i$	0,4710	9,9834

Neste caso, percebe-se que há uma pequena distorção na estimativa do modo de oscilação, principalmente envolvendo o método de Prony. Entretanto, apesar dessa distorção, as estimativas via método de Prony ainda são as mais próximas aos resultados do PacDyn.

### Estimativa de fatores de contribuição por barras de geração

Neste item, são apresentadas as estimativas de fatores de contribuição por barras de geração. Na Equação 4.4 são apresentadas as estimativas dos autovetores à direita, associado à amplitude e fase dos modos de oscilação nas barras de geração.

$$\hat{v} = \begin{pmatrix} 0,0145 - 0,0011i & 0,6517 - 0,3964i & -0,6379 - 0,3377i & 0,0131 + 0,3485i \\ 0,0101 + 0,0020i & -0,4290 + 0,6985i & 0,3678 - 0,4711i & 0,0003 + 0,3530i \\ 0,0250 - 0,0072i & -0,1246 - 0,4491i & 0,0322 + 0,8788i & 0,0189 + 0,3441i \\ -0,0235 + 0,0030i & 0,0028 - 0,0057i & -0,0030 + 0,0088i & 0,2503 + 0,5894i \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Utilizando-se a descrição matemática apresentada no capítulo anterior para estimar os fatores de participação, através do método de Prony, obtém-se a matriz de participação “P”, dada na Equação 4.5.

$$P = \begin{pmatrix} 0,1391 & 0,1522 & 0,4179 & 0,3769 \\ 0,1587 & 0,1200 & 0,4404 & 0,1956 \\ 0,1457 & 0,2976 & 0,1410 & 0,4261 \\ 0,5565 & 0,4302 & 0,0007 & 0,0014 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Estes fatores de participação estão associados aos quatro modos de menor amortecimento, apresentados na Figura 4.3, conforme pode ser observado no histograma da Figura 4.4.

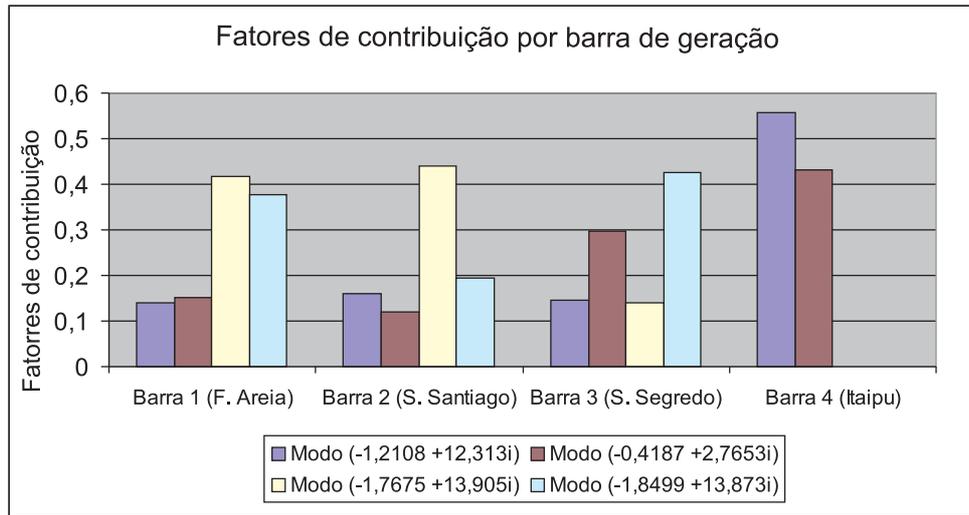


Figura 4.4: Fatores de contribuição do sistema equivalente.

Nota-se, a partir das estimativas dos fatores de contribuição, que os modos  $-0,4187 \pm 2,7653i$  e  $-1,2108 \pm 12,313i$  estão mais associados à Itaipu (barra 4), enquanto que os modos  $-1,7675 \pm 13,905i$  e  $-1,8499 \pm 13,873i$  estão associados à Salto Santiago (barra 2) e Salto Segredo (barras 3), respectivamente. Esses resultados são concordantes aos

obtidos na análise de fatores de participação utilizando-se o *software* PacDyn, conforme pode ser observado a seguir. Na Figura 4.5, são apresentados os fatores de participação associados ao modo  $-0,4187 \pm 2,7653i$ .

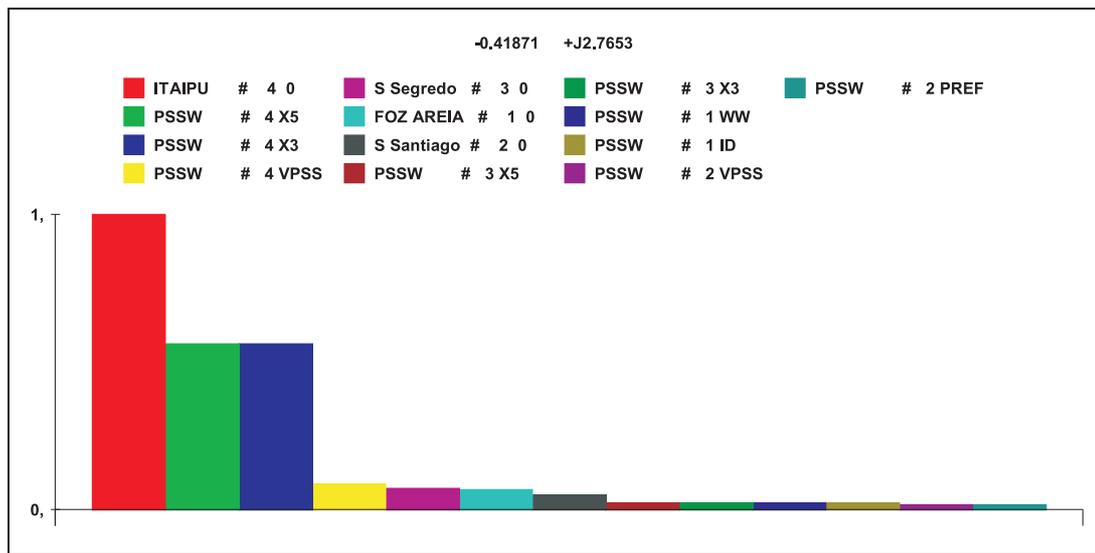


Figura 4.5: Fatores de participação (modo  $-0,4187 \pm 2,7653i$ ) - PacDyn.

Observa-se que o modo  $-0.4187 \pm 2.7653i$  está mais associado à Itaipu (barra 4). O mesmo ocorre com o modo  $-1,2108 \pm 12,313i$ , conforme pode ser observado na Figura 4.6.

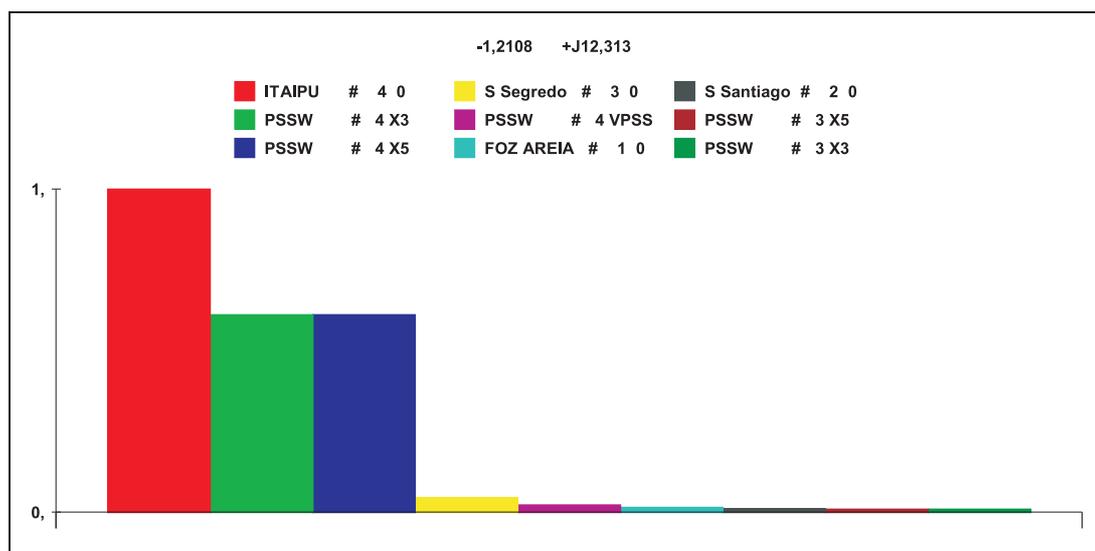


Figura 4.6: Fatores de participação ( modo  $-1,2108 \pm 12,313i$ ) - PacDyn.

O modo  $-1,7675 \pm 13,905i$  possui contribuições significativas de Salto Santiago

(Barra 2) e Foz do Areia (Barra 1), conforme Figura 4.7.

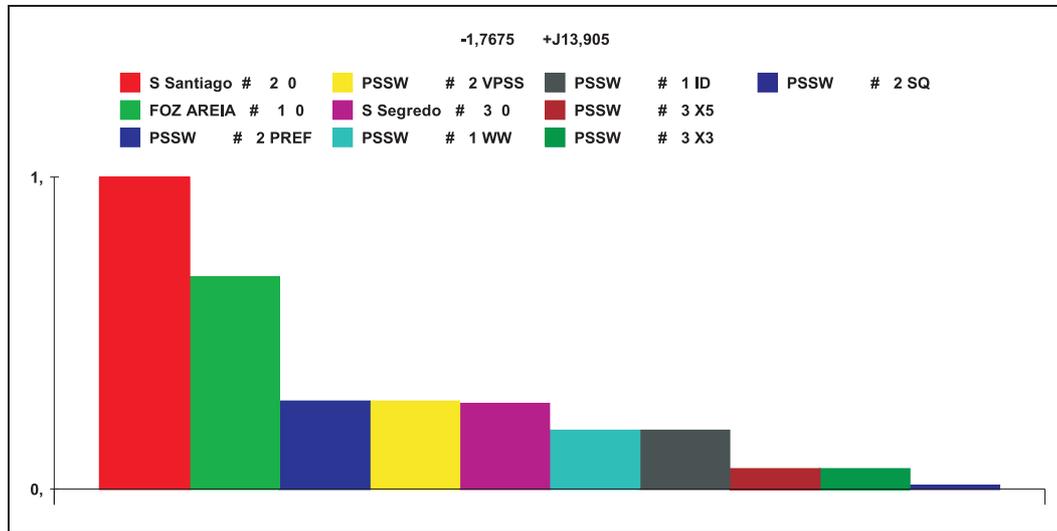


Figura 4.7: Fatores de participação (modo  $-1,7675 \pm 13,905i$ ) - PacDyn.

Na Figura 4.8, são apresentados os fatores de participação referentes ao modo  $-1,8499 \pm 13,873i$ .

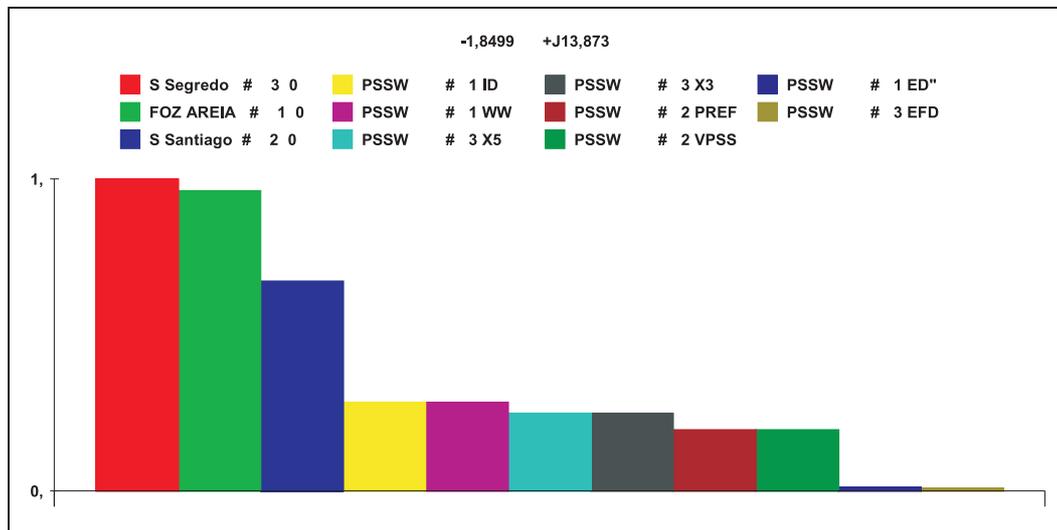


Figura 4.8: Fatores de participação (modo  $-1,8499 \pm 13,873i$ ) - PacDyn.

Nota-se que Salto Segredo (barras 1) e Foz do Areia (barra 3) contribuem praticamente com a mesma intensidade no modo de oscilação  $-1,8499 \pm 13,873i$ . Esse resultado também é obtido utilizando-se o método de Prony, conforme pode ser observado na Figura 4.4.

### Estimativa de *mode shapes*

Baseando-se nas informações dos autovetores à direita (Equação 4.4), estimou-se os *mode shapes* do Sistema Equivalente Brasileiro Sul Sudeste Modificado. Esses resultados, assim como os fatores de participação, foram comparados aos resultados obtidos através do *software* PacDyn. Na Figura 4.9, são apresentados os resultados obtidos para o modo  $-1, 2108 \pm 12, 313i$ .

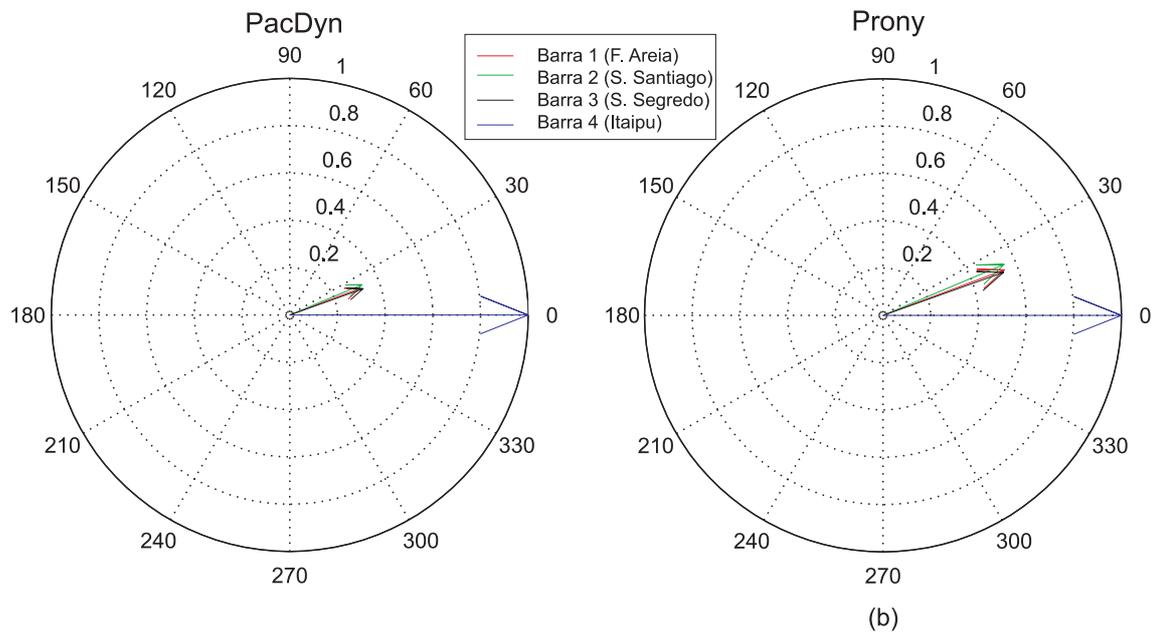


Figura 4.9: *Mode shapes* associados ao modo  $-1, 2108 \pm 12, 313i$ .

Nota-se que os resultados obtidos via método de Prony são muito similares aos obtidos através do *software* PacDyn. Percebe-se que o modo  $-1, 2108 \pm 12, 313i$  está relacionado aos geradores de Foz do Areia (barra 1), Salto Santiago (barra 2) e Salto Segredo (barra 3), oscilando em relação à Itaipu (barra 4). A diferença de escala, entre os módulos dos vetores estimados através do método de Prony e os obtidos através do PacDyn, ocorre porque os resultados do PacDyn são normalizados em função do vetor de maior módulo.

Nas figuras 4.10 e 4.11 são apresentados os resultados de *mode shapes* para os modos  $-1, 8499 \pm 13, 873i$  e  $-0, 41871 \pm 2, 7653i$ . Neste caso, observa-se uma pequena diferença entre os resultados do PacDyn e os obtidos através do método de Prony, associada principalmente à informação de fase dos modos. Ao analisar as causas dessas diferenças, constata-se que quando os modos possuem baixa amplitude, ou seja, não possuem uma contribuição significativa na resposta temporal do sistema, as estimativas de seus parâmetros através de método de Prony não são tão precisas. Entretanto, essas

diferenças não foram significativas a ponto de prejudicar a análise de *mode shapes*, ou seja, através dos resultados obtidos é possível verificar que os modos  $-1,8499 \pm 13,873i$  e  $-0,41871 \pm 2,7653i$  são modos de oscilação locais, entre Foz do Areia (barra 1), Salto Santiago (barra 2) e Salto Segredo (barra 3).

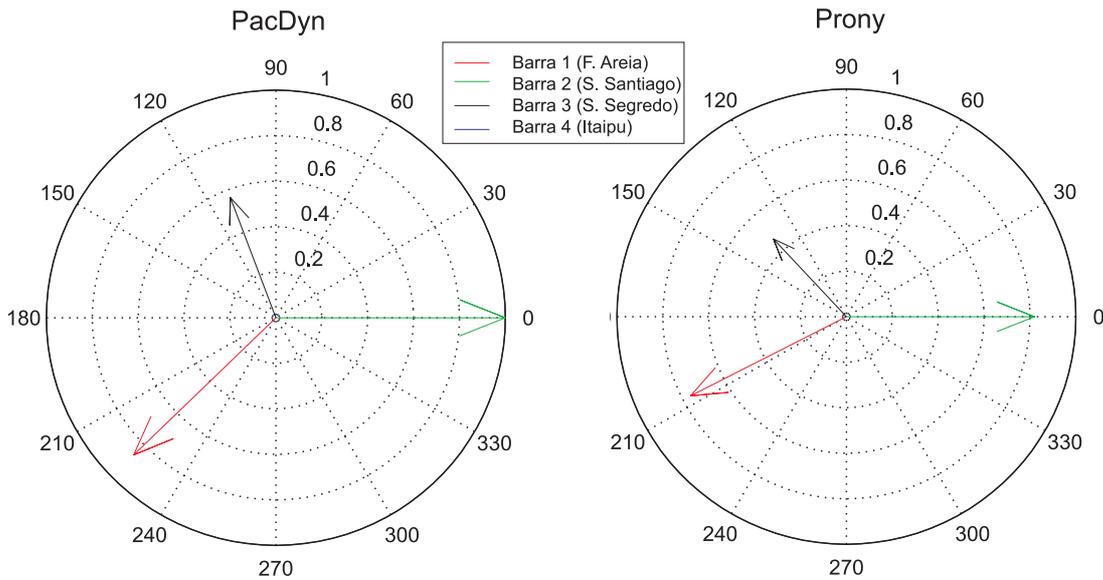


Figura 4.10: *Mode shapes* associados ao modo  $-1,7675 \pm 13,905i$ .

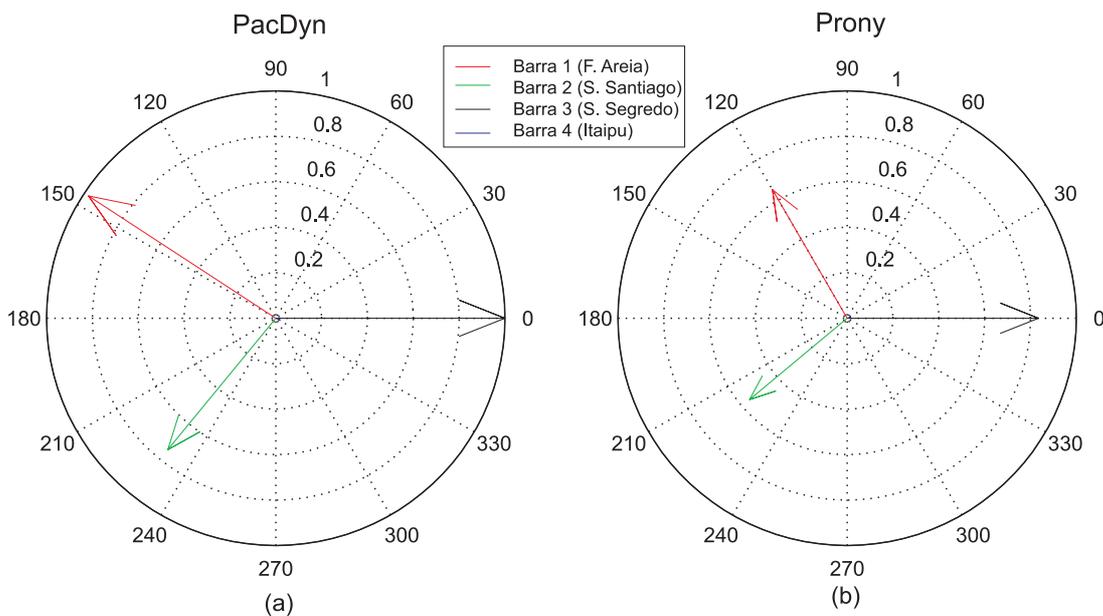


Figura 4.11: *Mode shapes* associados ao modo  $-1,8499 \pm 13,873i$ .

Na Figura 4.12, são apresentados os *mode shapes* associados ao modo  $-0,41871 \pm 2,7653i$ . Percebe-se que os resultados entre o método de Prony e o PacDyn são muito

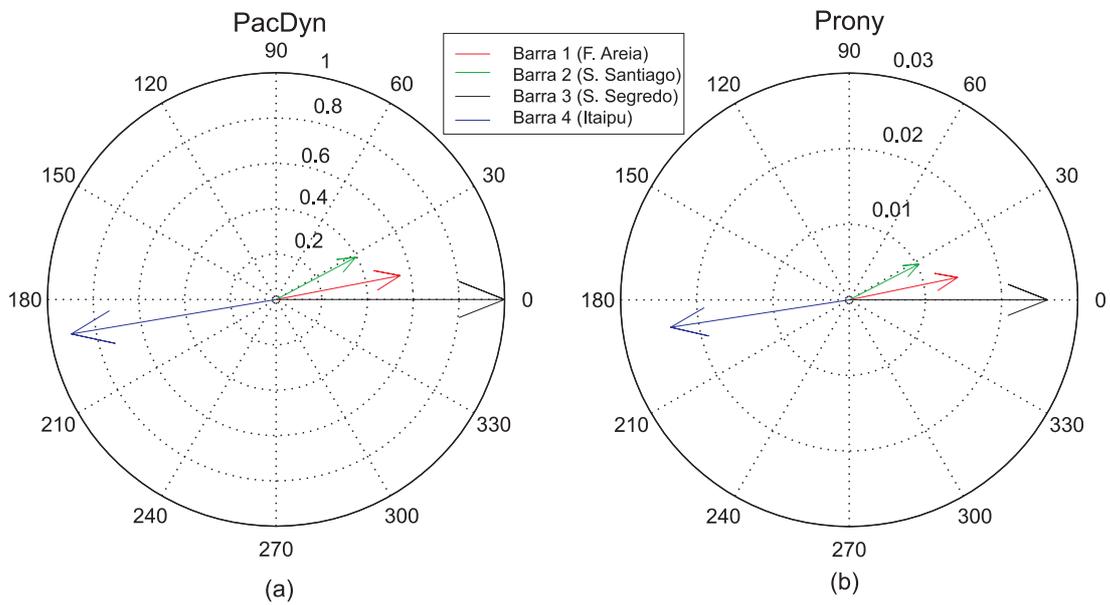


Figura 4.12: *Mode shapes* associados ao modo  $-0,41871 \pm 2,7653i$ .

semelhantes. Percebe-se que o modo  $-0,41871 \pm 2,7653i$  está relacionado à Foz do Areia (barra 1), a Salto Santiago (barra 2) e a Salto Segredo (barra 3), oscilando em relação à Itaipu (barra 4).



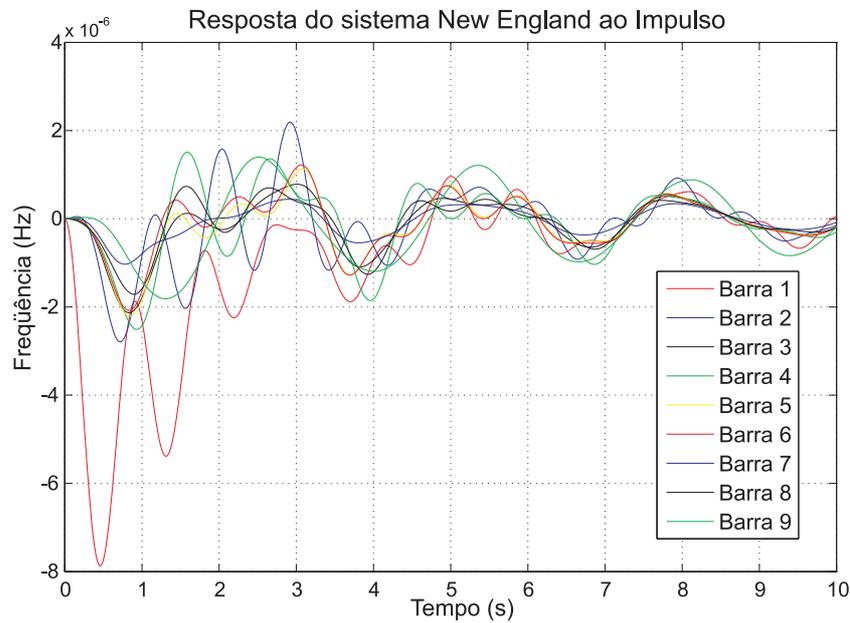


Figura 4.14: Resposta do sistema New England.

### Resultados do *Software* PacDyn

Os resultados do *software* PacDyn, referentes à identificação e caracterização dos modos de oscilação do sistema New England, são apresentados na Figura 4.15.

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	$\Delta$ Damp (%)	Part. Factor
1	-0.07967	2.3077	2.3091	0.3673	3.4504	WW Generator # 39 0
2	-0.07967	-2.3077	2.3091	-0.3673	3.4504	
3	-0.2817	7.5363	7.5416	1.1994	3.7355	WW Generator # 32 0
4	-0.2817	-7.5363	7.5416	-1.1994	3.7355	
5	-0.3778	8.6091	8.6174	1.3702	4.3838	WW Generator # 33 0
6	-0.3778	-8.6091	8.6174	-1.3702	4.3838	
7	-0.2816	6.3122	6.3185	1.0046	4.4568	WW Generator # 31 0
8	-0.2816	-6.3122	6.3185	-1.0046	4.4568	
9	-0.3150	6.9645	6.9716	1.1084	4.5185	WW Generator # 35 0
10	-0.3150	-6.9645	6.9716	-1.1084	4.5185	
11	-0.4540	8.7746	8.7863	1.3965	5.1666	WW Generator # 37 0
12	-0.4540	-8.7746	8.7863	-1.3965	5.1666	
13	-0.4673	8.9642	8.9763	1.4267	5.2059	WW Generator # 36 0
14	-0.4673	-8.9642	8.9763	-1.4267	5.2059	
15	-0.3102	5.8670	5.8751	0.9338	5.2793	WW Generator # 38 0
16	-0.3102	-5.8670	5.8751	-0.9338	5.2793	
17	-0.2565	4.0911	4.0992	0.6511	6.2582	WW Generator # 34 0
18	-0.2565	-4.0911	4.0992	-0.6511	6.2582	
19	-0.7096	1.7373	1.8767	0.2765	37.813	EQ' Generator # 38 0
20	-0.7096	-1.7373	1.8767	-0.2765	37.813	
21	-0.9502	1.1252	1.4727	0.1791	64.517	EQ' Generator # 36 0
22	-0.9502	-1.1252	1.4727	-0.1791	64.517	
23	-0.7151	0.7847	1.0616	0.1249	67.354	EQ' Generator # 34 0
24	-0.7151	-0.7847	1.0616	-0.1249	67.354	
25	-0.6009	0.3484	0.6946	0.05545	86.508	EQ' Generator # 31 0
26	-0.6009	-0.3484	0.6946	-0.05545	86.508	
27	-0.4768	0.2026	0.5180	0.03225	92.032	EQ' Generator # 33 0
28	-0.4768	-0.2026	0.5180	-0.03225	92.032	
29	-0.5535	0.2228	0.5967	0.03546	92.768	EQ' Generator # 31 0
30	-0.5535	-0.2228	0.5967	-0.03546	92.768	
31	-0.4587	0.1667	0.4881	0.02653	93.987	EQ' Generator # 35 0
32	-0.4587	-0.1667	0.4881	-0.02653	93.987	

Figura 4.15: Modos de oscilação - *software* PacDyn.

Neste caso, o modo de oscilação dominante identificado é  $-0,0796 \pm 2,3077i$ , com frequência de oscilação de  $0,3673 Hz$  e taxa de amortecimento de  $3,4504\%$ . A seguir,

são apresentados os resultados obtidos na estimativa deste modo, bem como a análise de fatores de contribuição das barras de geração e *mode shapes*.

### Estimativa de Freqüência e Taxa de Amortecimento

Na Tabela 4.3, são apresentados os resultados da estimativa da freqüência e a taxa de amortecimento do modo de oscilação dominante, considerando-se a ausência de ruídos no sinal de entrada.

Tabela 4.3: Estimativa do modo de oscilação dominante sem ruído.

Técnicas (ordem)	Autovalores ( $\lambda$ )	$f$ (Hz)	$\xi$ (%)
PacDyn	$-0,0796 \pm 2,3077i$	0,3673	3,4504
Prony (197)	$-0,0825 \pm 2,2976i$	0,3657	3,5873
AR (239)	$-0,1421 \pm 2,1361i$	0,3400	6,6363
ARMA (239,239)	$-0,1496 \pm 2,2711i$	0,3615	6,5737

Em termos de freqüência, o método de Prony e o modelo ARMA apresentam resultados semelhantes ao PacDyn. Entretanto, em relação à taxa de amortecimento, melhores resultados são obtidos com o método de Prony. Na Tabela 4.4, são apresentadas as estimativas do modo de oscilação dominante, considerando-se a presença de ruído no sinal de entrada.

Tabela 4.4: Estimativa do modo de oscilação dominante com SNR de 39dB.

Técnicas (ordem)	Autovalores ( $\lambda$ )	$f$ (Hz)	$\xi$ (%)
PacDyn	$-0,0796 \pm 2,3077i$	0,3673	3,4504
Prony (220)	$-0,1146 \pm 2,3480i$	0,3737	4,8742
AR (242)	$-0,1487 \pm 2,1398i$	0,3406	6,9330
ARMA (241,241)	$-0,1440 \pm 2,2724i$	0,3617	6,3254

Percebe-se que a presença de ruídos no sinal de entrada ocasionou pequenas distorções nas estimativas da freqüência de oscilação e taxa de amortecimento, sendo mais perceptíveis no método de Prony.

### Estimativa de fatores de contribuição por barras de geração

As estimativas de fatores de contribuição por barras de geração do sistema New England são descritas através da matriz de participação, dada pela Equação 4.6.

$$P = \begin{pmatrix} 0,0232 & 0,010 & 0,4402 & 0,2720 \\ 0,0247 & 0,0211 & 0,5504 & 0,2558 \\ 0,077 & 0,2837 & 0,0000 & 0,0315 \\ 0,053 & 0,0895 & 0,0000 & 0,2261 \\ 0,0092 & 0,2438 & 0,0082 & 0,1039 \\ 0,0126 & 0,0597 & 0,0008 & 0,0331 \\ 0,0126 & 0,252 & 0,0003 & 0,0039 \\ 0,0553 & 0,0347 & 0,0001 & 0,0673 \\ 0,7322 & 0,0054 & 0,0000 & 0,0065 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Esta matriz de participação está associada aos quatro modos de oscilação de menor amortecimento do sistema New England (Figura 4.15), detalhados no histograma da Figura 4.16.

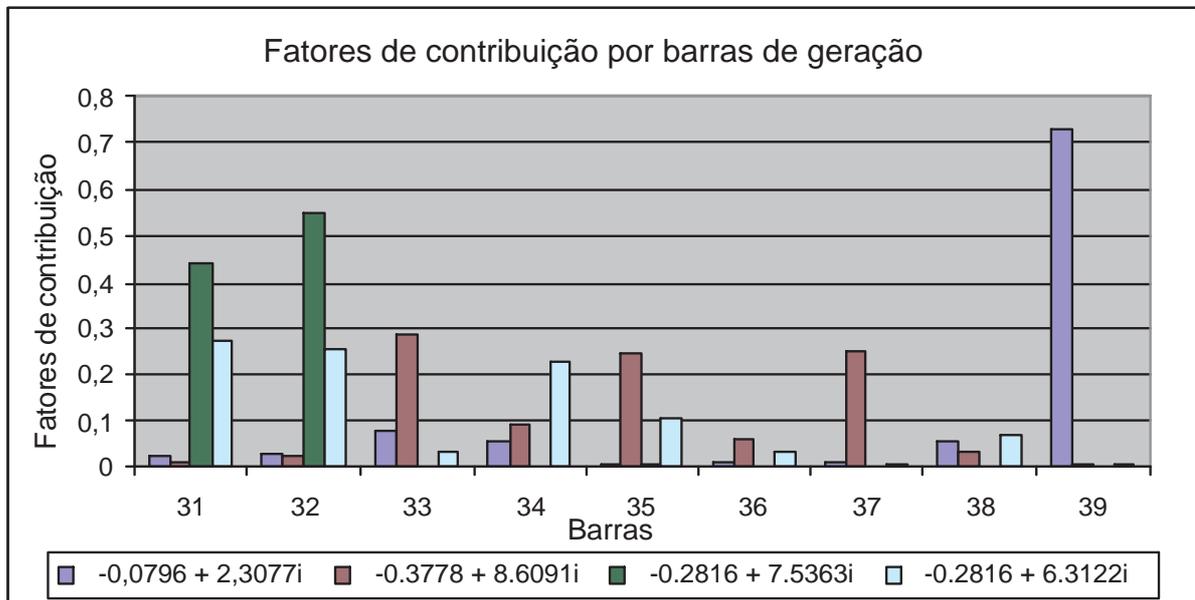


Figura 4.16: Fatores de contribuição no sistema New England.

Observa-se que os modos  $-0,0796 \pm 2,3077i$ ,  $-0,3778 \pm 8,069i$ ,  $-0,2816 \pm 7,5363i$  e  $-0,2816 \pm 6,3122i$  estão mais associados às barras 39, 33, 32 e 31, respectivamente. Esses resultados são semelhantes aos obtidos através do *software* PacDyn, conforme os dados apresentados a seguir. Na Figura 4.17, apresentam-se os *mode shapes* referentes ao modo  $-0,0796 \pm 2,3077i$ .

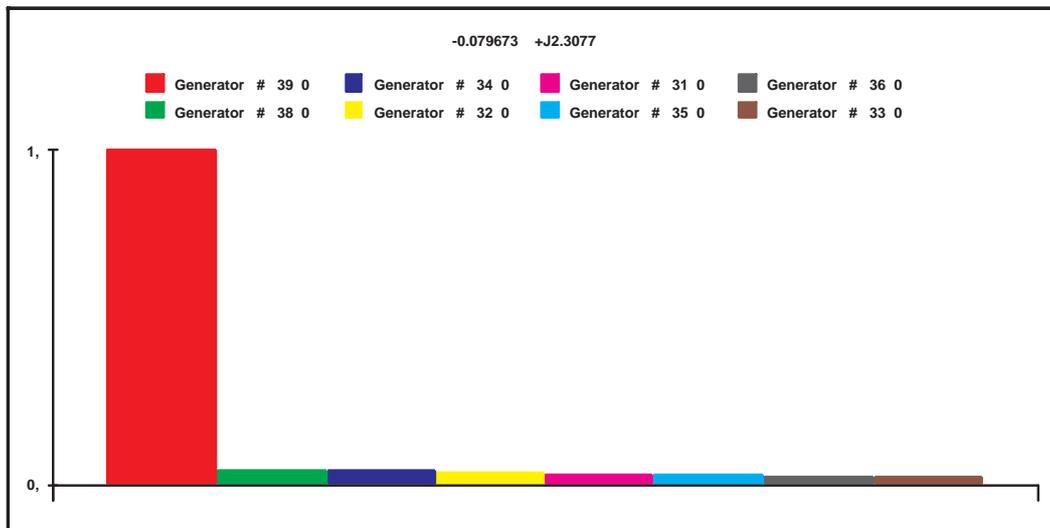


Figura 4.17: Fatores de participação (modo  $-0,0796 \pm 2,3077i$ ) - PacDyn.

Observa-se que o modo  $-0,0796 \pm 2,3077i$  está fortemente associado à barra 39. O mesmo ocorre com o modo  $-0,3778 \pm 8,069i$ , porém em relação à barra 33, conforme pode ser observado na Figura 4.18.

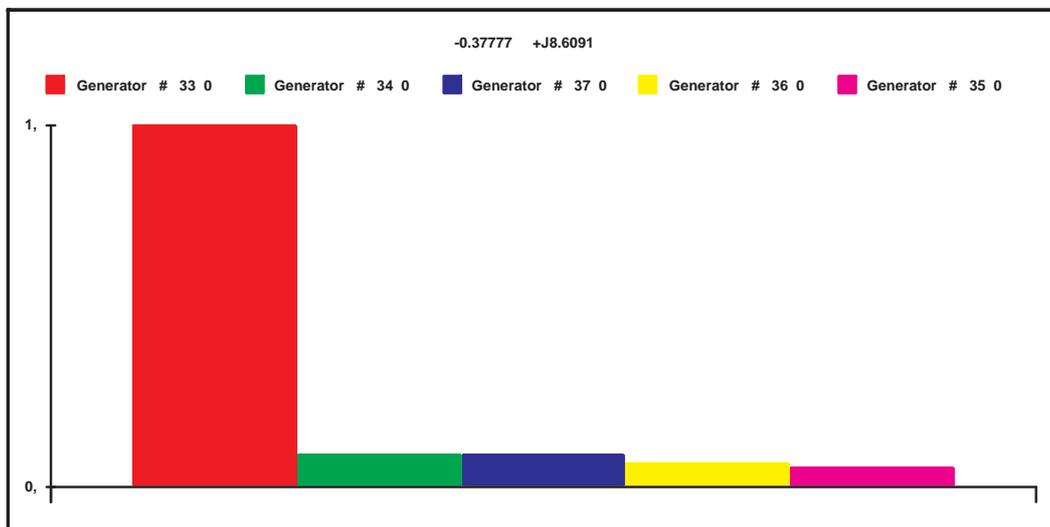


Figura 4.18: Fatores de participação (modo  $-0,3778 \pm 8,069i$ ) - PacDyn.

Nestes casos, observam-se diferenças entre as estimativas e os resultados do *software* PacDyn, pois o método de Prony (Figura 4.16) indica, além da barra 33, uma significativa contribuição das barras 35 e 37. Essas diferenças são decorrentes da baixa amplitude destes modos na resposta temporal do sistema, o que dificulta a estimativa de seus parâmetros.

Na Figura 4.19, são apresentados os *mode shapes* relacionados ao modo  $-0,2816 \pm 7,5363i$ , onde percebe-se que as barras 31 e 32 contribuem de forma significativa no referido modo. Este comportamento é também observado nos resultados obtidos através do método de Prony.

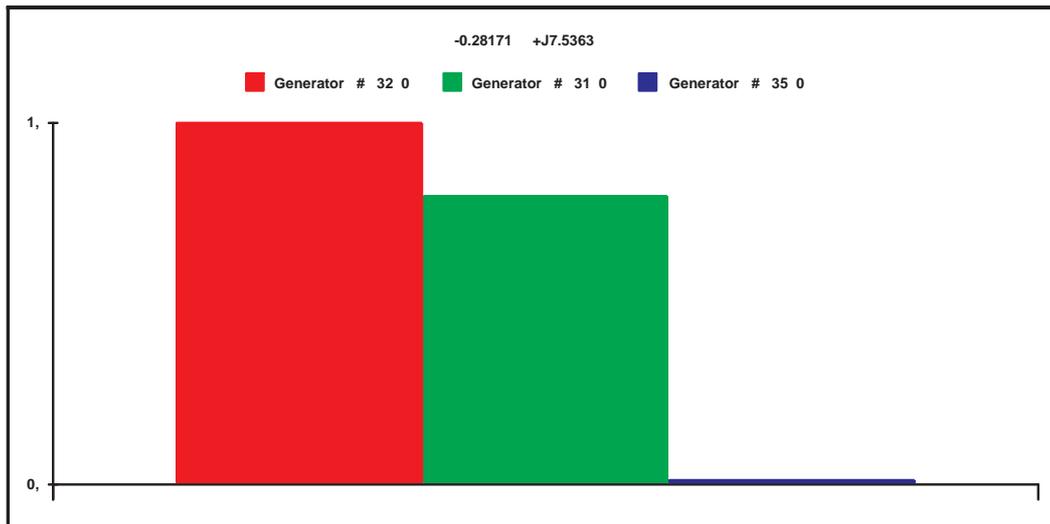


Figura 4.19: Fatores de participação (modo  $-0,2816 \pm 7,5363i$ ) - PacDyn.

O modo  $-0,2816 \pm 6,3122i$ , embora esteja mais associado à barra 31, também possui contribuições significativas das barras 32 e 34, conforme pode ser observado na Figura 4.20.

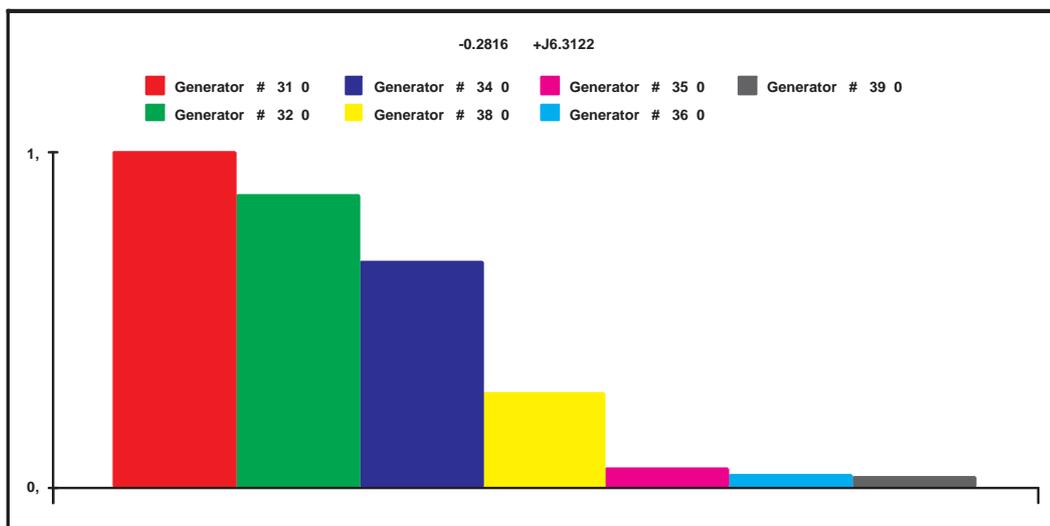


Figura 4.20: Fatores de participação (modo  $-0,2816 \pm 6,3122i$ ) - PacDyn.

**Estimativa de *mode shapes***

A seguir, são apresentadas as estimativas dos *mode shapes* referentes aos modos de oscilações analisados anteriormente, no estudo de fatores de contribuição. Na Figura 4.21, são apresentados os *mode shapes* associados ao modo  $-0,0796 \pm 2,3077i$ .

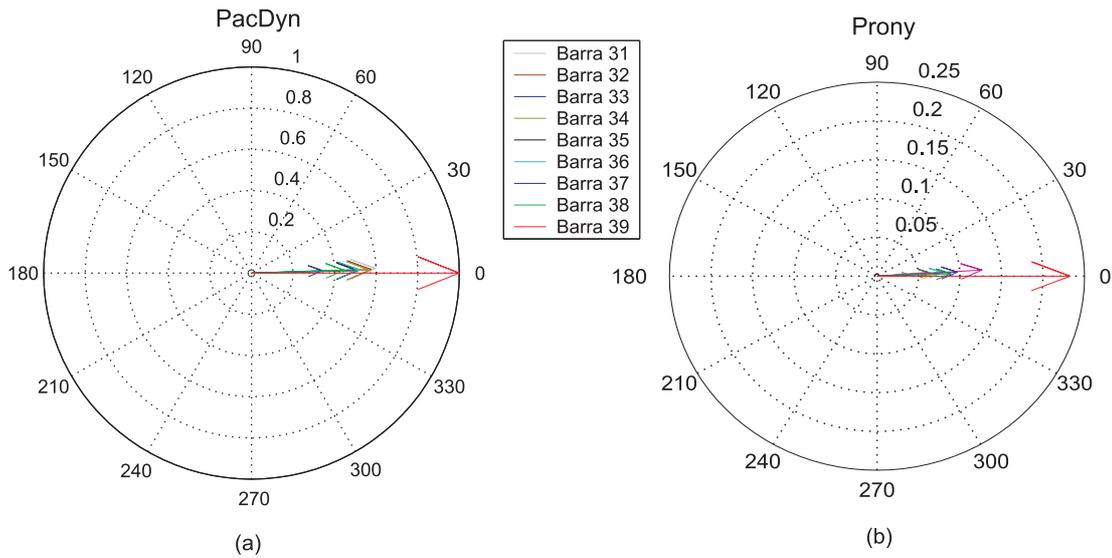


Figura 4.21: *Mode shapes* associados ao modo  $-0,0796 \pm 2,3077i$ .

Nota-se que os valores obtidos via método de Prony são muito semelhantes aos resultados do PacDyn. O mesmo ocorre para o modo  $-0,2817 \pm 7,5363i$ , conforme pode ser observado na Figura 4.22.

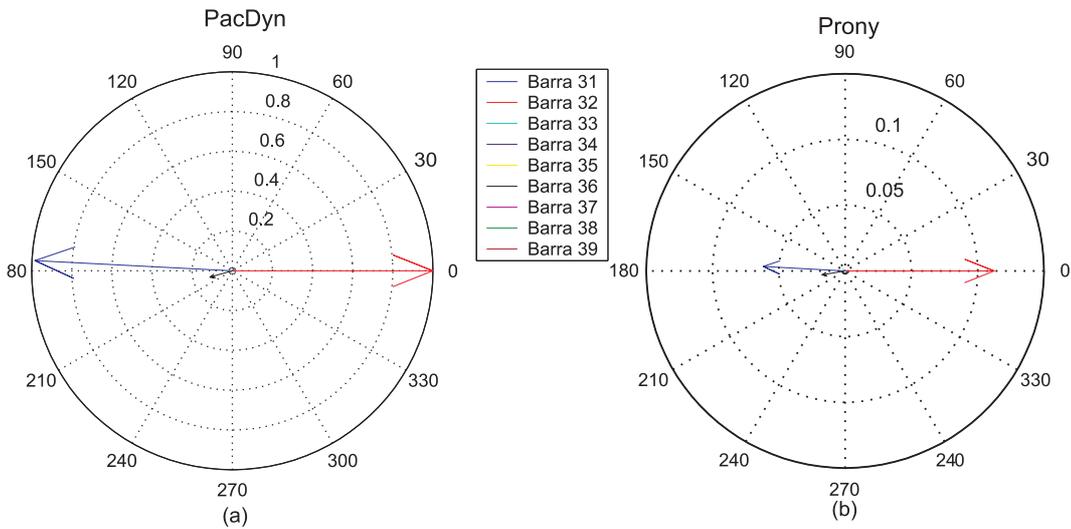


Figura 4.22: *Mode shapes* associados ao modo  $-0,2817 \pm 7,5363i$ .

Os *mode shapes* dos modos  $-0,3778 \pm 8,069i$  e  $-0,2816 \pm 6,3122i$  são descritos nas

figuras 4.23 e 4.24. Nestes casos, observam-se pequenas diferenças entre os resultados do *software* PacDyn e aqueles obtidos através do método de Prony. Conforme já mencionado, essas diferenças são decorrentes da baixa amplitude destes modos na resposta temporal do sistema.

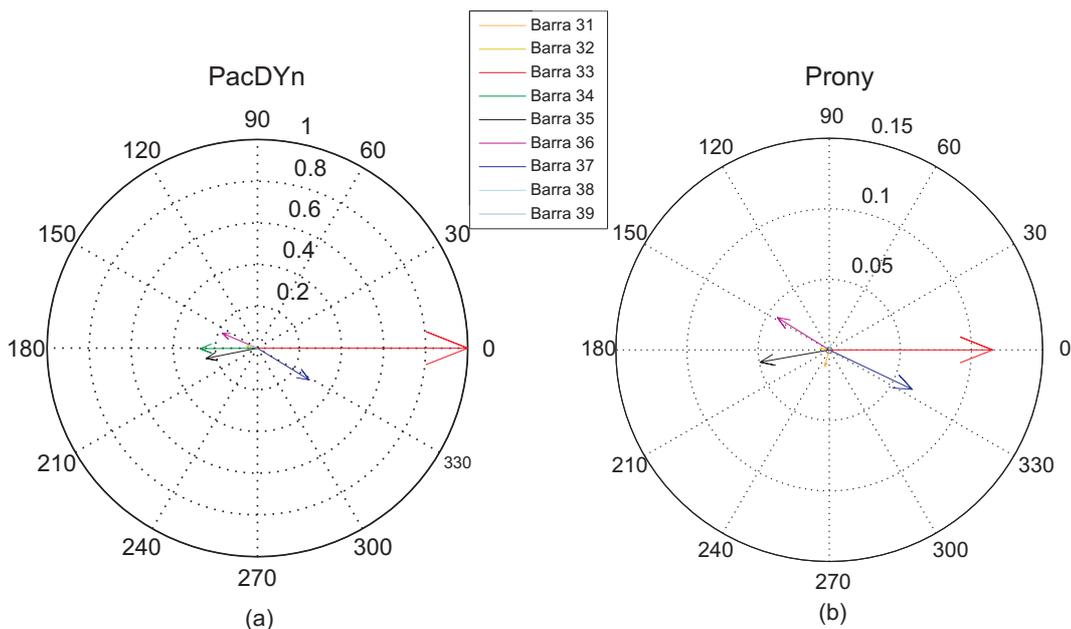


Figura 4.23: *Mode shapes* associados ao modo  $-0,3778 \pm 8,069i$ .

Entretanto, apesar dessas diferenças, os resultados obtidos são muito semelhantes aos do PacDyn e permitem verificar a interação desses modos no sistema.

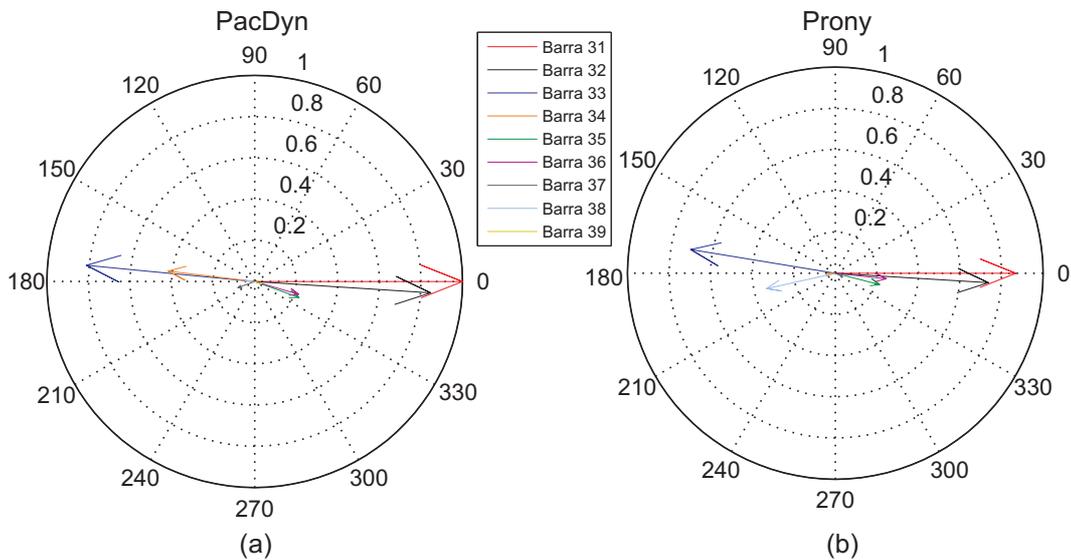


Figura 4.24: *Mode shapes* associados ao modo  $-0,2816 \pm 6,3122i$ .

## 4.2 Estudos de Caso

Nesta seção apresentam-se resultados da análise do comportamento dinâmico do SIN, utilizando-se dados de medição fasorial e a metodologia apresentada no capítulo anterior. Os resultados apresentados a seguir se baseiam em dados históricos de monitoramento, disponibilizados pelo protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada do Projeto MedFasee. Este protótipo é constituído de três PMUs instaladas em três capitais da região sul do Brasil (Curitiba, Florianópolis e Porto Alegre), e um PDC localizado no LabPlan. A Figura 4.25 apresenta a tela de monitoramento, em tempo real, da frequência e dos fasores de tensão.

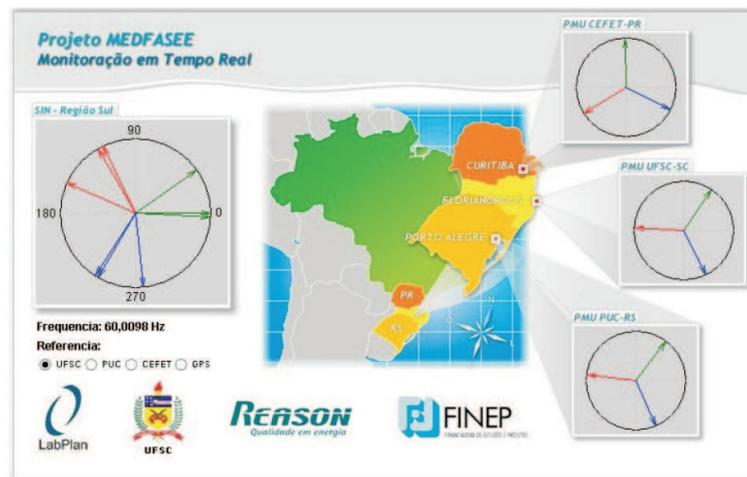


Figura 4.25: Tela de monitoração em tempo real.

Na página da Internet, <http://www.labplan.ufsc.br/medfasee>, pode ser visualizado o monitoramento em tempo real, da frequência e dos fasores de tensão medidos pelo protótipo.

O protótipo MedFasee opera a uma taxa de aquisição de 60 fasores por segundo (um fasor por ciclo), usando o protocolo de comunicação UDP/IP e está conectado à rede baixa tensão (220/127V). Durante o período de elaboração deste estudo, foram registrados diversos eventos, dos quais destacam-se:

- 09/01/06 - desligamento automático da unidade geradora 7 da Usina Térmica de Jorge Lacerda C;
- 07/03/07 - desligamento da LT Guarulhos/Norte de 345kV;
- 13/03/07 - separação do SIN em dois subsistemas;
- 17/04/07 - abertura de várias LTs de 230kV da empresa CEEE <sup>2</sup>.

<sup>2</sup>CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica do estado do Rio Grande do Sul)

A seguir apresentam-se em detalhes duas dessas ocorrências. A ocorrência de 09/01/06, envolvendo o desligamento da Unidade Geradora (U.G.) 7 da Usina Térmica de Jorge Lacerda C e a ocorrência de 13/03/07, referente à abertura da interligação Norte-Nordeste e Sul-Sudeste-Centro-Oeste. Cabe ressaltar que a análise de fatores de participação ficou prejudicada em virtude do reduzido número de PMUs, o que acabou por inviabilizar a análise.

#### 4.2.1 Desligamento da U.G. 7 da usina Jorge Lacerda C

Conforme relatado pelo ONS<sup>3</sup>, às 13h46min do dia 09/01/2006, ocorreu o desligamento automático da unidade geradora (UG) 7 da Usina Térmica de J. Lacerda C, ocasionando baixos níveis de tensão no sul do estado de Santa Catarina. Em consequência, a partir das 14h19min, e aliado à indisponibilidade da LT 138 kV Itajaí/Camboriú Morro do Boi, houve corte manual de 35,1 MW de cargas da Celses, nas cidades de Tubarão, Braço do Norte, Forquilha, Lauro Muller e Laguna. A causa do desligamento da referida UG foi baixa pressão na fornalha. No site do ONS (<ftp://ftpbsb.ons.org.br/ipdo/>) podem ser encontrados mais detalhes sobre essa ocorrência.

Na Figura 4.26 é representado o comportamento da frequência durante o distúrbio, registrado pelo protótipo MedFasee em Curitiba, Florianópolis e Porto Alegre.

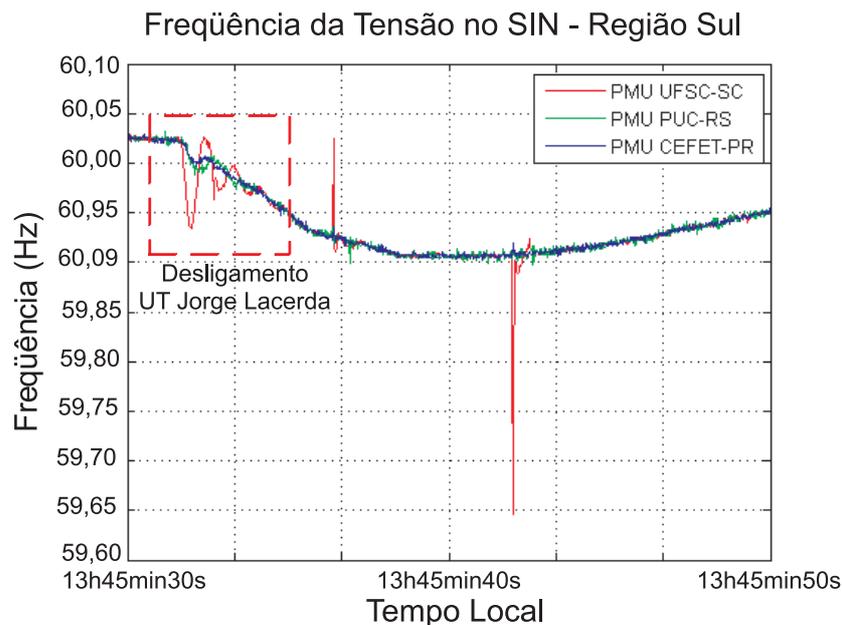


Figura 4.26: Frequência da tensão no SIN.

<sup>3</sup>ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

Observando-se a Figura 4.26, percebe-se a presença de oscilações eletromecânicas logo após o desligamento da usina (quadro em destaque). Tais oscilações são apresentadas na figura 4.27.

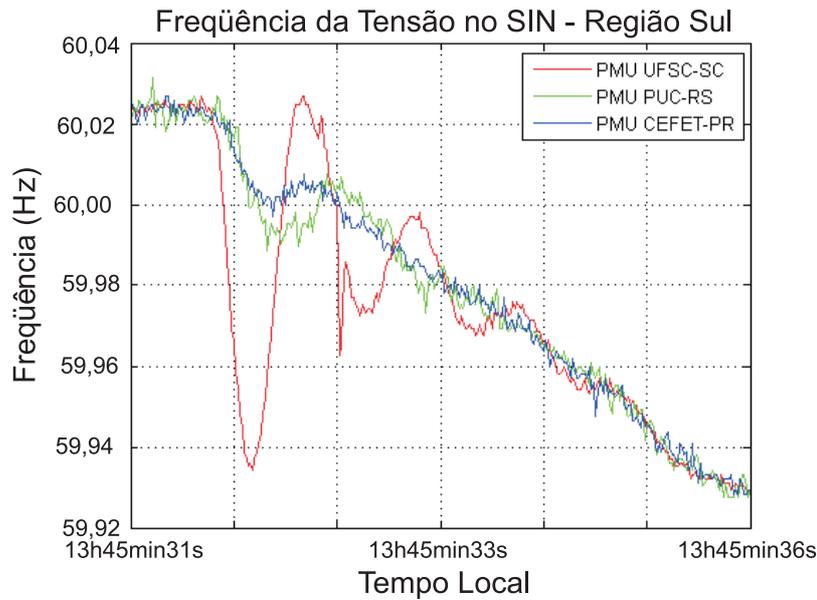


Figura 4.27: Oscilações eletromecânicas - Desligamento da U.G. 7 da usina Jorge Lacerda C.

Ao se aplicar o método de Prony e os modelos AR e ARMA para identificar e caracterizar os modos eletromecânicos, associados ao comportamento oscilatório em Florianópolis (PMU-UFSC), obteve-se os resultados apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Estimativa dos modo de oscilação associados à U.G. 7 de Jorge Lacerda C.

Técnicas (ordem)	Autovalores ( $\lambda$ )	$f$ (Hz)	$\xi$ (%)
Prony (66)	$-0,9669 \pm 7,2048i$	1,1437	13,2033
AR (135)	$-1,2053 \pm 7,8466i$	1,2488	15,1829
ARMA (130,130)	$-0,8808 \pm 7,0356i$	1,1197	12,4224

Neste caso, a ordem do método de Prony e dos modelos AR e ARMA identificadas são 66, 135 e 130, respectivamente. O método de Prony e o modelo ARMA apresentam resultados semelhantes, ou seja, a frequência do modo de oscilação dominante na ordem de 1,12Hz a 1,14Hz (frequência característica de um modo local) e a taxa de amortecimento de 13%. Estes valores são muito semelhantes aos resultados apresentados em Decker et al. (2006a), onde apresenta-se um estudo utilizando-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*), o critério de SPR (*Successive Peak Ratio*) e simulações, considerando a topologia do sistema quando da ocorrência,

com um perfil de carga média. Os resultados obtidos indicam um modo de oscilação dominante com frequência na faixa de 1,14Hz e um amortecimento na ordem de 13,5%.

Na Figura 4.28, são apresentados os resultados de *mode shapes*, associados ao modo identificado.

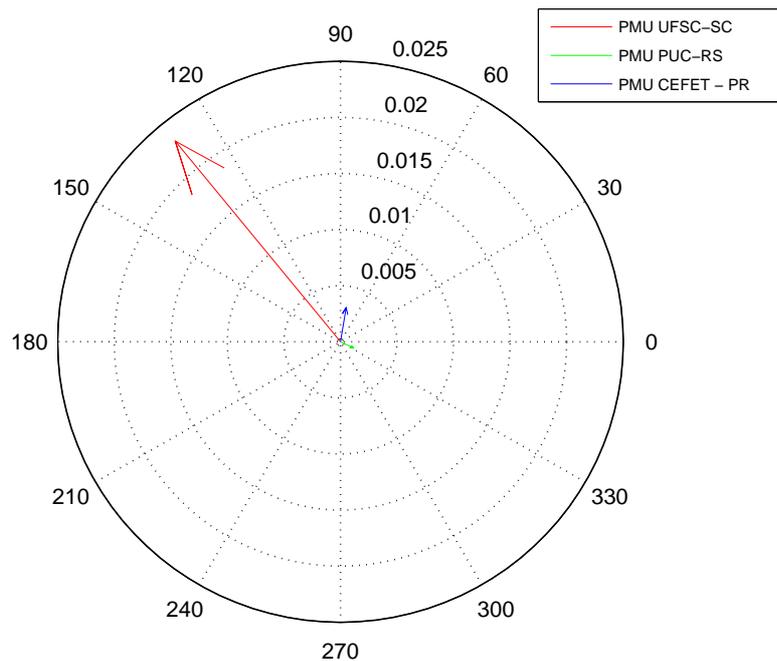


Figura 4.28: *Mode shapes* associados à U.G. 7 de Jorge Lacerda C

Observando-se a Figura 4.28, percebe-se que o modo identificado está mais presente em Florianópolis, em relação a Porto Alegre e Curitiba. Isto ocorre devido à proximidade da usina de Jorge Lacerda C à cidade de Florianópolis. Nota-se ainda uma defasagem de aproximadamente  $180^\circ$  entre Florianópolis e Porto Alegre.

### 4.2.2 Desligamento da Interligação Norte-Sul

Conforme relatado pelo ONS no IPDO do dia 13/03/2007, às 14h23min, ocorreu o desligamento automático dos seguintes equipamentos:

- LT 500kV Serra da Mesa-Gurupi circuito 1 (FURNAS) e 2 (NOVATRANS), abrindo a interligação Norte-Sudeste;
- LT 500kV Gurupi-Miracema circuito 1 (FURNAS) e 2 (NOVATRANS);
- LT 500kV Colinas-Miracema circuito 1 (FURNAS);
- LT 500kV Imperatriz-Colinas circuito 2 (NOVATRANS);
- LT 500kV Serra da Mesa-Samambaia circuito 1 (FURNAS);
- LT 500kV Serra da Mesa-Rio das Éguas-Bom Jesus da Lapa II (TRANSENER), abrindo a interligação Sudeste-Nordeste;
- LT 500kV Gurupi-Peixe Angical (FURNAS);
- LT 230kV Barro Alto-Niquelândia (FURNAS).

Esta ocorrência teve as seguintes consequências: separação do SIN em dois subsistemas, Norte-Nordeste e Sul-Sudeste-Centro-Oeste. A frequência do subsistema Norte-Nordeste variou de 60,00Hz para 59,85Hz a 61,71Hz e no subsistema Sul-Sudeste-Centro-Oeste de 60,00Hz a 59,30Hz. Houve a rejeição de geração de 945MW na UH Tucuruí (ELETRONORTE), UGs nº 9, 17 e 19, de 300MW na UH Peixe Angical (ENERPEIXE), UGs nº 1, 2 e 3 e, ainda, a perda de 22MW de carga da CELTINS, alimentadas pela UH Peixe Angical e de 49MW da CNT (Companhia Níquel Tocantins) suprida pela CELG.

A normalização do sistema se deu da seguinte maneira: as cargas interrompidas foram normalizadas imediatamente. Às 14h47min, foram interligados os dois subsistemas Norte-Nordeste e Sul-Sudeste-Centro-Oeste restabelecendo-se o SIN, com o fechamento do circuito 1 Serra da Mesa-Gurupi-Miracema. Às 15h18min foi normalizada a interligação Sudeste-Nordeste e às 15h23min, foi concluída a normalização do sistema com o fechamento da LT 500kV Serra da Mesa-Samambaia circuito 1. No momento da ocorrência, houve interrupção do fluxo de potência entre as regiões Norte e Sudeste e do Nordeste para o Sudeste.

O protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada do Projeto MedFasee registrou esse evento, cujo comportamento da frequência da tensão é apresentado na Figura 4.29.

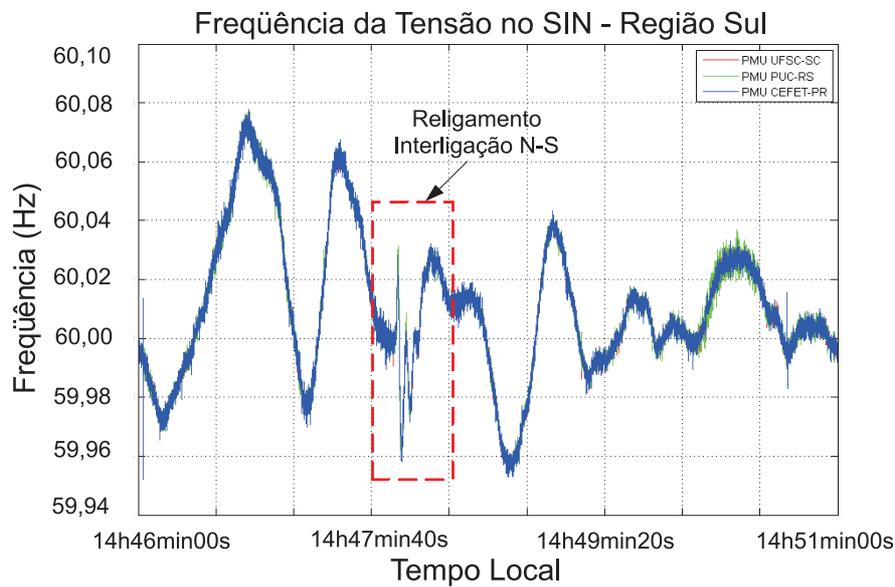


Figura 4.29: Frequência da tensão no SIN.

Observando-se a Figura 4.29 (quadro em destaque), nota-se a presença de oscilações eletromecânicas logo após o religamento da interligação N-S, as quais estão apresentadas na Figura 4.30.

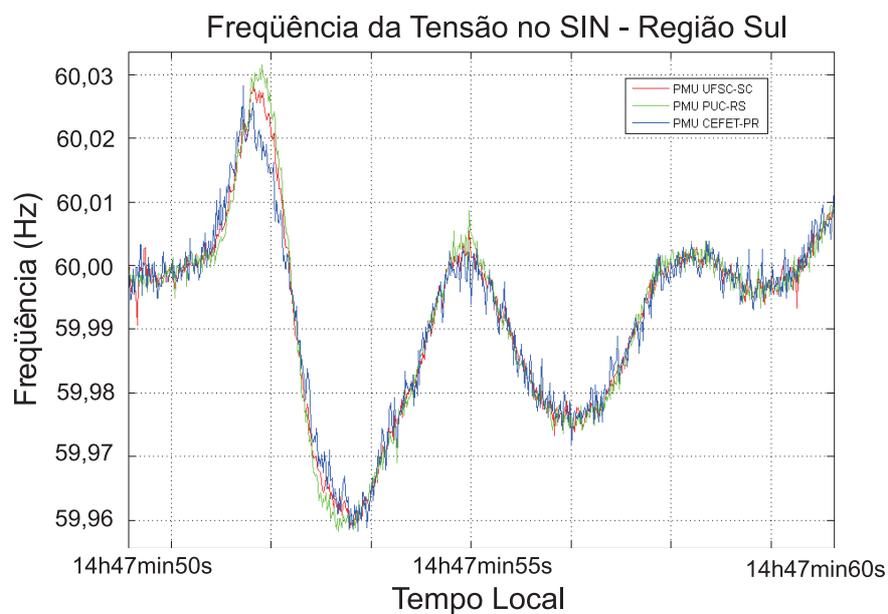


Figura 4.30: Oscilações eletromecânicas - religamento da interligação Norte-Sul.

Aplicando-se as técnicas descritas anteriormente, associados ao comportamento oscilatório da frequência em Florianópolis (comportamento similar nas três capitais),

obteve-se os resultados apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Estimativa do modo de oscilação associado ao religamento da interligação Norte-Sul.

Técnicas (ordem)	Autovalores ( $\lambda$ )	$f$ (Hz)	$\xi$ (%)
Prony (257)	$-0,1945 \pm 1,7239i$	0,2744	11,2091
AR (252)	$-0,3261 \pm 1,8332i$	0,2918	17,5109
ARMA (130,130)	$-0,1826 \pm 1,8633i$	0,2966	9,7537

A ordem identificada no método de Prony e nos modelos AR e ARMA são 257, 252 e 130, respectivamente. Assim como no caso anterior, o método de Prony e o modelo ARMA apresentam resultados semelhantes, ou seja, a identificação de um modo dominante com frequência na ordem de 0,27Hz a 0,29Hz (frequência característica de um modo inter-área) e amortecimento de aproximadamente 11,2091%. Estes valores são similares aos resultados tipicamente encontrados em estudos de oscilações eletromecânicas envolvendo a interligação Norte-Sul, utilizando-se *softwares* de análise de estabilidade para pequenas perturbações e configurações da rede elétrica com somente um circuito ativo na interligação. Estes resultados também são com os resultados apurados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, conforme pode ser observado na Figura 4.31.

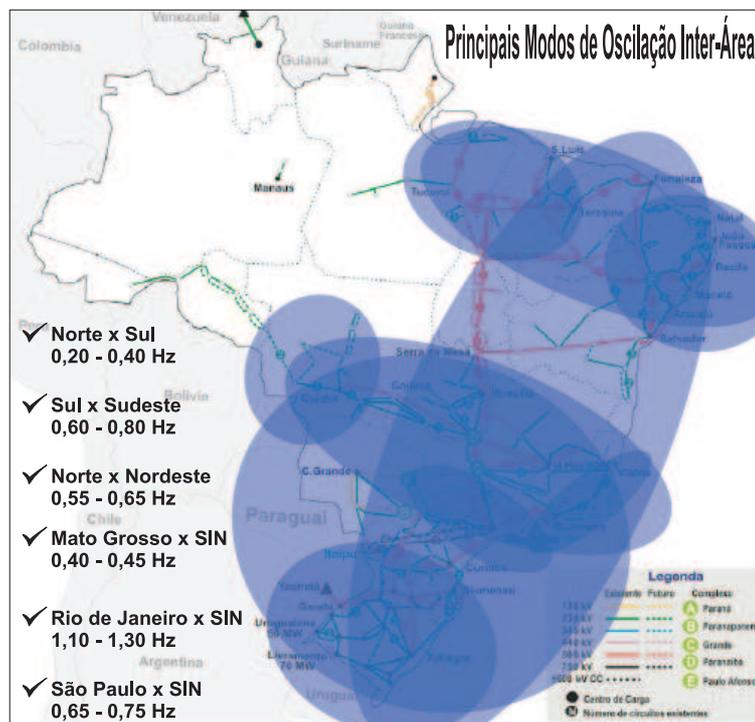


Figura 4.31: Principais modos inter-área do SIN (Fonte: ONS, 2007).

Observa-se que a frequência do modo de oscilação inter-área Norte-Sul, identificado através dos métodos paramétricos está na faixa de 0,20 a 0,40 Hz, ou seja, concordante com os resultados do ONS.

Na Figura 4.32, são apresentados os resultados de *mode shapes* associados ao modo identificado.

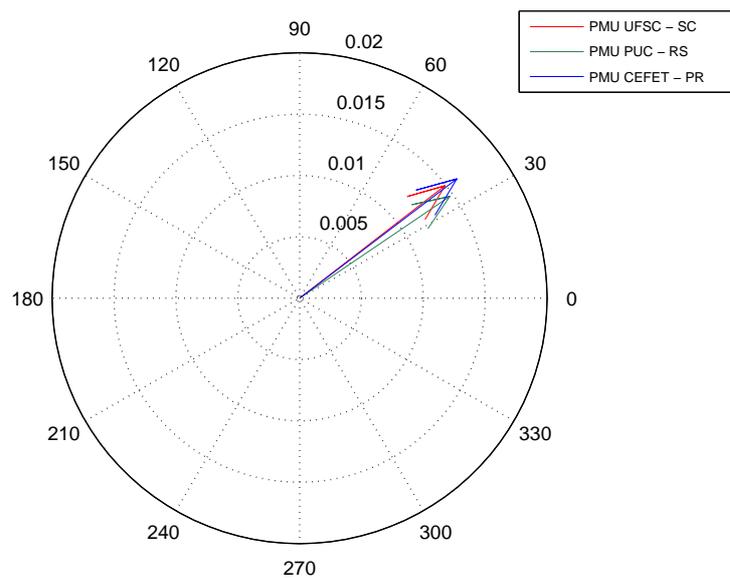


Figura 4.32: *Mode shapes* - desligamento da interligação Norte-Sul.

Percebe-se na Figura 4.32, que o modo identificado está presente em Curitiba, Florianópolis e Porto Alegre, com amplitudes e fases similares. Essa concordância de comportamento nas três capitais da região sul do país é coerente, visto que a identificação está associado ao modo inter-área norte-sul, ou seja, ao modo de oscilação dos geradores da região Norte-Nordeste oscilando em relação aos geradores da região Sul-Sudeste-Centro-Oeste. Assim, como as PMUs do protótipo MedFasee estão instaladas apenas na região sul, o comportamento observado a partir dela é similar.

# Capítulo 5

## Conclusões

Os estudos envolvendo Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS - *Synchronized Phasor Measurement System*) vêm despertando grande interesse da comunidade científica, empresas e órgãos governamentais, em diversos países. Esse interesse está associado principalmente às aplicações de SPMSs, que possuem grandes potencialidades para a melhoria dos sistemas de supervisão, controle e proteção, atualmente utilizados em SEE. Entretanto, uma parcela significativa dessas aplicações encontra-se em fase inicial de pesquisa ou ainda é pouco explorada.

Atualmente, no Brasil, existem apenas dois protótipos de sistema de medição fasorial sincronizada em operação, referentes ao projeto MedFasee e Eletrosul. Existe ainda a expectativa da implementação do projeto de medição sincronizada de fasores do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), com objetivos iniciais de desenvolver ferramentas para registro do desempenho dinâmico do SIN, durante perturbações sistêmicas, e melhoria do processo de estimação de estados.

Desse modo, visando contribuir para o desenvolvimento de pesquisas futuras, apresentou-se neste trabalho um estudo sobre os SPMSs, com ênfase em suas potenciais aplicações, bem como seu estágio atual de desenvolvimento.

Constata-se que são diversas as potencialidades dos SPMSs, tais como: monitoramento da operação de geradores; análise de oscilações de baixa frequência; melhoria nos processos de estimação de estados; localização de faltas sustentadas e transitórias em LTs; melhoria das ações preventivas, corretivas e restaurativas dos sistemas de controle; e a verificação e validação de modelos. Essas aplicações não são excludentes, ou seja, elas não descartam, mas associam-se aos conhecimentos construídos no decorrer do tempo e visam contribuir para a melhoria do que já foi desenvolvido. Além disso, existe um grande potencial dessas aplicações interagirem entre si, devido à facilidade com que os dados fasoriais são unificados no concentrador de dados, estreitando assim as distâncias entre o monitoramento e as ações de controle e proteção. Essa carac-

terística de interatividade, viabilizada através de SPMSs, tende a ser o foco principal das futuras pesquisas.

Baseado nesse contexto, e visando contribuir para o desenvolvimento das aplicações de SPMSs, o objetivo central deste trabalho foi estudar o comportamento dinâmico de SEE, através do monitoramento de oscilações de baixa frequência, utilizando-se dados de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada. Optou-se por abordar o monitoramento de oscilações de baixa frequência, porque é uma das principais aplicações em pesquisa atualmente. Além disso, acredita-se que o monitoramento antecede e contribui para as aplicações de controle e proteção.

O objetivo central da metodologia desenvolvida foi identificar e caracterizar modos de oscilação eletromecânicos, em termos de frequência de oscilação, taxa de amortecimento, fator de participação de geradores e *mode shapes*, visando fornecer informações sobre condições inseguras de operação, bem como subsídios para a tomada de decisão, acerca de ações de controle contra-oscilatórias.

Apresentou-se uma metodologia utilizando o método de Prony e os modelos Auto-Regressivo (AR) e Auto-Regressivo de Média Móvel (ARMA). Utilizou-se esses métodos por fornecerem informações que os métodos convencionais não fornecem, tais como taxa de amortecimento, amplitude e fase dos modos de oscilação. Além disso, tais métodos não utilizam janelas de tempo, reduzindo-se assim os impactos de distorção.

Implementou-se, ainda, uma metodologia para estimação de fatores de participação de geradores e *mode shapes*, utilizando-se o método de Prony, baseado na estreita relação entre estimativas das amplitudes e fases dos modos, nas barras do sistema, e os autovetores à direita, o que tornou viável a reconstrução da matriz reduzida  $A$  do sistema, associada às variáveis monitoradas. Assim, a partir dessa matriz, foi possível estimar os autovetores à esquerda e, conseqüentemente, determinar os fatores de participação. A principal restrição associada a essa abordagem é que somente se mostra possível calcular os fatores de contribuição das variáveis de estado passíveis de serem monitoradas.

Os resultados dos estudos de simulação, para estimação de frequência de oscilação e taxa de amortecimento, demonstram o bom desempenho dos métodos, com exceção ao modelo AR, o qual apresentou erros significativos nas estimativas, associados principalmente à taxa de amortecimento. O método de Prony e o modelo ARMA apresentaram resultados semelhantes, embora melhores estimativas foram obtidas através do método de Prony. Constatou-se que a presença de ruídos no sinal de entrada causou distorções nas estimativas, as quais foram mais perceptíveis no método de Prony, que apresentou maior sensibilidade ao efeito dos ruídos.

Os resultados da análise de fatores de participação por barra de geração e *mode*

*shapes*, utilizando-se o método de Prony, também foram coerentes aos obtidos através do *software* PacDyn. Verificou-se, em relação às estimativas de fatores de participação por barra de geração e *mode shapes*, que quando os modos possuem baixa amplitude, ou seja, não possuem uma contribuição significativa na resposta temporal do sistema, a estimativa de seus parâmetros, através de método de Prony, não é tão precisa. Entretanto, essas distorções não foram significativas a ponto de prejudicar a análise.

Em relação aos estudos de caso, foram analisados dois grandes eventos no Sistema Interligado Nacional (SIN), associados ao desligamento de uma unidade geradora da usina de Jorge Lacerda C e a abertura da interligação Norte-Nodeste e Sul-Sudeste-Centro-Oeste, comumente denominada interligação Norte-Sul. No evento envolvendo a usina de Jorge Lacerda C identificou-se um modo de oscilação eletromecânico local, com frequência de oscilação na ordem de 1,12Hz a 1,14Hz e taxa de amortecimento da ordem de 13%. Esses valores coerentes aos obtidos em outros estudos de simulação. Em relação à abertura da interligação Norte-Sul, identificou-se no momento do religamento da interligação, um modo de oscilação inter-área, com frequência na ordem de 0,27Hz a 0,29Hz e taxa de amortecimento de aproximadamente 11,2091%. Tais resultados foram concordantes aos tipicamente encontrados em estudos de oscilações eletromecânicas envolvendo a interligação Norte-Sul.

Além da caracterização dos modos de oscilação, em termos de frequência e amortecimento, estimou-se também os *mode shapes*, constatando-se a significativa presença em Florianópolis do modo associado à usina de Jorge Lacerda C, bem como o similar comportamento do modo inter-área Norte-Sul, nas três capitais da região sul do país.

Esses resultados de identificação de oscilações eletromecânicas no SIN, a partir do monitoramento na rede de baixa tensão a milhares de quilômetros do local dos eventos, denotam o grande potencial da medição fasorial e o bom desempenho da metodologia implementada.

## 5.1 Principais Contribuições

Como principais contribuições do presente trabalho, destaca-se:

- Estudo do estado da arte acerca das potenciais aplicações da tecnologia de medição fasorial sincronizada, organizadas em quatro categorias: aplicações básicas, de monitoramento, controle e proteção; e especiais;
- Análise do método de Prony e dos modelos Auto-Regressivo e Auto-Regressivo de Média Móvel, aplicados para estimação da frequência de oscilação e taxa de

amortecimento de modos de oscilação eletromecânicos, usando dados de medição fasorial;

- Cálculo de fatores de participação de variáveis de estado monitoráveis, por barras de geração, utilizando o método de Prony;
- Cálculo de *mode shapes* via método de Prony;
- Extração de informações relevantes sobre o comportamento dinâmico do SIN, a partir do monitoramento de SPMSs na rede de baixa tensão.

## 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com o propósito de possibilitar a continuidade das pesquisas sobre o tema, enumeram-se as seguintes sugestões de desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de ferramentas computacionais baseadas na metodologia proposta, visando fornecer indicativos de condições inseguras de operação, associadas a modos de oscilação pouco amortecidos, em tempo real.
- Exploração de possíveis aplicações das informações de frequência de oscilação, taxa de amortecimento, fatores de participação e *mode shapes*, disponibilizadas através do monitoramento de oscilações eletromecânicas, para desenvolverem-se esquemas de controle de amortecimento e proteção *off-line* e em tempo real.
- Estender a metodologia apresentada, através da investigação de novos métodos paramétricos, baseados em sistemas multi-entradas e multi-saídas (MIMO), visando o processamento de dados de monitoramento de SPMSs, de diversas barras do sistema, simultaneamente.

# Apêndice A

## Dados dos Sistemas Teste

### A.1 Dados do Sistema Equivalente Sul-Sudeste

#### A.1.1 Dados de barra - Sistema Equivalente Sul-Sudeste

Frequência 60Hz, Base = 1000 (MVA)

Tabela A.1: Dados de barra - Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

Barra	Tensão		Geração		Carga		Shunt(p.u)
	Magnitude	Ângulo	MW	MVAr	MW	MVAr	
1	1,030	24, 5°	1658	-412,0	2405	467	0,1792
2	1,030	27, 2°	1332	-200,1	692,3	-184	0,1491
3	1,029	26, 6°	1540	-446,5	688,2	-235	0,1142
4	1,039	48, 5°	6500	1958,6	62,6	-24,3	0,0368
5	0,998	21, 2°	-	-	845,8	-9,2	0,0330
6	0,989	21, 4°	-	-	-4,9	79,8	2,1420
7	0,966	00, 0°	-3164	952,7	2884	-196	0,0420

#### A.1.2 Dados de linha - Sistema Equivalente Sul-Sudeste

A susceptância equivalente das linhas do sistema de sete barras foi combinada aos reatores *shunt* das barras e o valor total é dado na tabela A.1.

Desconsiderou-se a resistência do estator e a constante de amortecimento de todas as máquinas.

Utilizou-se o modelo de quinta ordem e os reguladores de tensão com os parâmetros:

$$AVR = \frac{30}{a + s0,05} \quad (A.1)$$

Tabela A.2: Dados de linha - Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

De	Para	$R + jX$
1	3	$0,003 + j0,038$
2	3	$0,005 + j0,076$
4	6	$0,0029 + j0,0731$
5	1	$0,019 + j0,245$
5	2	$0,015 + j0,225$
6	5	$0 + j0,039$
6	7	$0,004 + j0,057$

### A.1.3 Dados dos geradores síncronos - Sistema Equivalente Sul-Sudeste

Tabela A.3: Dados dos geradores síncronos - Sistema Equivalente Sul-Sudeste.

Barra	MVA	T'do	T''do	T'''qo	H	xd	xq	x'd	x''d	x''q
1	1900	5	0,053	0,123	4,5	0,85	0,7	0,3	0,2	0,2
2	1400	5	0,053	0,123	4,5	0,85	0,7	0,3	0,2	0,2
3	1944	5	0,006	0,09	4,5	0,88	0,69	0,3	0,2	0,2
4	6633	7,6	0,09	0,19	5,07	0,9	0,68	0,3	0,24	0,27
7	6000	8	0,09	0,2	5	1	0,7	0,3	0,25	0,25

## A.2 Dados do Sistema New England

### A.2.1 Dados de barra

Frequência 60Hz, Base = 1000 (MVA)

Tabela A.4: Dados de barra - Sistema New England.

Carregamento			Carregamento		
barra	MW	MVar	barra	MW	MVar
1			21	274,0	115,0
2			22		
3	332,0	2,4	23	247,5	84,6
4	500,0	184,0	24	308,6	-92,2
5			25	224,0	47,2
6			26	139,0	17,0
7	233,8	84,0	27	281,0	75,5
8	522,0	176,0	28	206,0	27,6
9			29	283,5	26,9
10			30		
11			31	9,2	4,6
12	8,5	88,0	32		
13			33		
14			34		
15	320,0	153,0	35		
16	329,4	32,3	36		
17			37		
18	158,0	30,0	38		
19			39	1104,0	250,0
20	680,0	103,0			

## A.2.2 Dados de linha

Tabela A.5: Dados de linha - Sistema New England.

De	Para	R (p.u.)	X(p.u.)	S. (MVar)	De	Para	R (p.u.)	X(p.u.)	S. (MVar)
01	02	0,0035	0,0411	69,87	14	15	0,0018	0,0217	36,60
01	39	0,0010	0,0250	75,00	15	16	0,0009	0,0094	17,10
02	03	0,0013	0,0151	000,00	16	17	0,0007	0,0089	13,42
02	25	0,0070	0,0086	000,00	16	19	0,0016	0,0195	30,40
02	30	0,0000	0,0181	000,00	16	21	0,0008	0,0135	25,48
03	04	0,0013	0,0213	22,14	16	24	0,0003	0,0059	6,80
03	18	0,0011	0,0133	21,38	17	18	0,0007	0,0082	13,19
04	05	0,0008	0,0128	13,42	17	27	0,0013	0,0173	32,16
04	14	0,0008	0,0129	13,82	19	20	0,0007	0,0138	00,00
05	06	0,0002	0,0026	4,34	19	33	0,0007	0,0142	00,00
05	08	0,0008	0,0112	14,76	20	34	0,0009	0,0180	00,00
06	07	0,0006	0,0092	11,30	21	22	0,0008	0,0140	25,65
06	11	0,0007	0,0082	13,89	22	23	0,0006	0,0096	18,46
06	31	0,0000	0,0025	000,00	22	35	0,0000	0,0143	00,00
07	08	0,0004	0,0046	7,80	23	24	0,0022	0,0350	36,10
08	09	0,0023	0,0363	38,04	23	36	0,0005	0,0272	00,00
09	39	0,0010	0,0250	120,00	25	26	0,0032	0,0323	51,30
10	11	0,0004	0,0043	7,29	25	37	0,0006	0,0232	00,00
10	13	0,0004	0,0043	7,29	26	27	0,0014	0,0147	23,96
10	32	0,0000	0,0200	000,00	26	28	0,0043	0,0474	78,02
11	12	0,0016	0,0435	000,00	26	29	0,0057	0,0625	102,90
12	13	0,0016	0,0435	000,00	28	29	0,0014	0,0151	24,90
13	14	0,0009	0,0101	17,23	29	38	0,0008	0,0156	00,00



# Referências Bibliográficas

ARAÚJO, C. S.; CRUZ, D. P. M.; LEDO, T. G.; ORDACGI, F. J. M.; MORAES, R. M.; GIOVANINI, R.; VOLSKIS, H. A. R.; ESTEVES, A. C. Utilização de fatores no sistema interligado nacional. *SIMPASE - Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos*, Agosto 2007.

AVELEDA, A. D. A. *Utilização De Sistemas De Alto Desempenho No Processamento De Sinais Na Análise De Problemas De Vibrações Induzidas Por Desprendimento De Vórtices Em Estruturas Offshore*. Tese (Doutorado) — UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

BAZÁN, B. F. S. *Desenvolvimento de Ferramentas de Identificação Paramétrica de Sistemas Mecânicos no Domínio do Tempo*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Novembro 1993.

BERTSCH, J.; CARNAL, C.; KORBA, M. P.; INGRAM; BROSKI, L.; SATTINGER, W. Experiences and benefits of systems for wide area monitoring. *WPDA - Western Power Delivery Automation Conference*, April 2004.

BETTIOL, A. L.; LIRA, R.; DECKER, I. C.; ZIMATH, S. L. Localização de faltas em linhas de transmissão usando medição fasorial sincronizada. *XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE*, Outubro 2005.

BOLFE Édson L.; VASCO, L. S. T. *Aplicações de GPS - Sistemas de Posicionamento Global*. [S.l.], Abril 2005.

CARDOSO, M. I. *Problemas de Identificação Paramétrica*. Dissertação (Mestrado) — UFSC Universidade Federal de Santa Catarina, Março 2000.

CHOW, J.; CHAKRABORTTY, A.; ARCAK, M.; BHARGAVA, B.; SALAZAR, A. Synchronized phasor data based energy function analysis of power transfer paths. *IEEE - Power Engineering Society General Meeting*, p. 18–22, June 2006.

CIGRÉ. *Wide Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement*. [S.l.], August 2007.

COSTA, A. S.; SALGADO, R. *Análise Estática de Segurança de Sistema Elétricos de Potência, Apostila. LABSPOT/EEL/UFSC*. 2002.

DECKER, I. C.; DOTTA, D.; AGOSTINI, M. N.; SILVA, A. S. e; ZIMATH, S. L.; BETTIOL, A. L. Applications of a synchronized phasor measurements system in southern brazil. *Anais do X Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning- SEPOPE*, 2006.

DECKER, I. C.; DOTTA, D.; AGOSTINI, M. N.; ZIMATH, S. L.; SILVA, A. S. e. Performance of a synchronized phasor measurements system in the brazilian power system. *IEEE - Power Engineering Society General Meeting*, p. 18–22, june 2006.

DECKER, I. C.; EHRENSPERGER, J. G.; AGOSTINI, M. N.; SILVA, A. L.; BETTIOL, A. S.; ZIMATH, S. L. Synchronized phasor measurement system: Development and applications. *Anais do IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning- SEPOPE*, p. 93–96, 2004.

EHRENSPERGER, J. G. *Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Análise do Estado da Arte e Aplicações no Monitoramento de Sistemas de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Maio 2002.

FALCÃO, D. M. *Análise Técnico-Econômica de Sistemas de Energia Elétrica, Nota de Aula. UFRJ/COPPE*. 2007.

FAUCON, O.; DOUSSET, L. Coordinate defense plan protects against transient instabilities. *IEEE - Computer Applications in Power*, v. 10, n. 3, p. 22–26, 1997.

GAO, H.; HE, J.; JIANG, S. Gps synchronized digital current differential protection for transmission lines. *Electric Power Systems Research*, v. 62, n. 1, p. 29–36, May 2002.

GASCA, J. J. S.; CHOW, J. H. Performance comparison of three identification methods for the analysis of electromechanical oscillations. *IEEE - Transactions on Power Systems*, v. 14, p. 955–1002, August 1999.

STRANG G. *Linear Algebra and Its Applications*. 3. ed. Harcourt Brace & Company, Orlando, 1998.

HAUER, J. F.; BESHIR, M. J.; MITTELSTADT, W. A. Dynamic performance validation in the western power system. *APEX*, October 2000.

HUANG, Z.; KOSTEREV, D.; GUTTROMSON, R. Model validation with hybrid dynamic simulation. *IEEE - Power Engineering Society General Meeting*, p. 18–22, June 2006.

JIANG, J. A.; LIU, C. W.; CHEN, C. S. A novel adaptive pmu based transmission line relay design and emtp simulation results. *IEEE - Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 4, p. 930–937, October 2002.

KARLSSON, D.; HEMMINGSSON, M.; LINDAHL, S. Wide area system monitoring e control: Terminology, phenomena, and solution implementation strategies. *IEEE - Power and Energy Magazine*, v. 2, p. 68–76, September-October 2004.

KAY, S. M. *Modern Spectral Estimation: Theory and Application*. [S.l.]: Prentice Hall, 1987.

KHATIB, A. R.; NUQUI, R. F.; INGRAM, M.; PHADKE, A. G. Real-time estimation of security from voltage collapse using synchronized phasor measurements. *IPEC - Power Engineering Conference*, v. 1, p. 582–588, June 2004.

KOSTEREV, D. Hydro turbine-governor model validation in pacific northwest. *IEEE - Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 2, p. 1144–1149, May 2004.

KOSTEREV, D.; ESZTERGALYOS, J.; STIGERS, C. Feasibility study of using synchronized phasor measurements for generator dropping controls in the colstrip system. *IEEE - Transactions on Power Systems*, v. 13, n. 3, p. 755–761, August 1998.

KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. 1. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc, New York, 1994.

MARINI, R. L. V. *Uso de Medição Fasorial Sincronizada Visando a Melhoria de Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Março 2005.

MARPLE, S. L. *Digital Spectral Analysis with Applications*. [S.l.]: Prentice Hall, 1987.

MARTINEZ, C.; PARASHAR, M.; DYER, J. Wide area monitoring control phasor data requirements. *EIPP Real Time Task Team. White Paper DRAFT*, December 2004.

MARTINS, N. Eigenvalue and frequency domain analysis of small signal electromechanical stability problem. *IEEE - Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Method for System Dynamic Performance*, p. 17–33, 1989.

- MORAES, R. M. de. *Aplicações de Unidades de Medição de Fasores no Brasil*. [S.l.], Novembro 2007.
- MOREIRA, M. S.; LEIRIA, A. I.; MADEIRA, M. M.; RUANO, M. da G. Processamento de sinais em tempo real: Desafios e constrangimentos. In: *I Jornada Iberoamericana de Ultrasonidos*. [S.l.: s.n.], 1998.
- NADUVATHUPARAMBIL, B.; VALENTI, M.; FELIACHI, A. Communication delays in wide area measurement systems. *Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory*, p. 118–122, 2002.
- NIGLYE, N.; PERITORE, F. S.; SOPER, R. D.; ANDERSON, C.; MOXLEY, R.; GUZMÁN, A. Considerations for the application of synchrophasors to predict voltage instability. *Top Twelve - Schweitzer Engineering Laboratories, Inc*, 2005.
- PERUYERO, M. A. S.; ROMÁN, C. G. M. Phasor measurement unit pmus applications in the transmission network of cfe México. *CIGRE*, 2006.
- PHADKE, A.; THORP, J. S.; KARINI, K. State estimation with phasor measurements. *International Conference on Power System Technology*, v. 1, n. 1, p. 1–5, October 2006.
- PHADKE, A. G. Synchronized phasor measurements in power systems. *IEEE - Computer Applications in Power*, v. 6, p. 10–15, April 1993.
- PHADKE, A. G. Synchronized phasor measurements: A historical overview. *IEEE/PES - Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, p. pp 476–479, october 2005.
- ROGERS, G. *Power System Oscillations*. 1. ed. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, Boston, 2000.
- ROJAS, D. E. I. *Métodos de Redução de Ordem Aplicados a Sistemas de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Março 1994.
- SAUER, P. W.; PAI, M. A. *Power System Dynamics and Stability*. 1. ed. [S.l.]: Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- SCALA, M. L.; BENEDICTIS, M. D.; BRUNO, S.; GROBOVOY, A.; BONDAREVA, N.; BORODINA, N.; DENISOVA, D.; GERMOND, A.; CHERKAOUI, R. Development of applications in wams and wacs: an international cooperation experience. *IEEE - Power Engineering Society General Meeting*, p. 18–22, June 2006.

SHI, B.; XIE, X.; HAN, Y. Wams-based load shedding for systems suffering power deficit. *IEEE/PES - Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, p. 1–6, 2005.

SILVA, A. S. e; COSTA, A. J. S. *Aspectos Dinâmicos do Controle de Sistemas de Potência, Apostila. LABSPOT/EEL/UFSC*. 2006.

SILVA, M. da. *Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria de ondas viajantes e transformada de wavelet*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2003.

SONG, F.; BI, T.; YANG, Q. Study on wide area measurement system based transient stability control for power system. *IPEC - Power Engineering Conference*, v. 2, p. 757–760, December 2005.

STOICA, P.; MOSES, R. *Introduction to Spectral Analysis*. [S.l.]: Prentice Hall, 1997.

TRUDNOWSKI, D.; DONNELLY, M.; HAUER, J. A procedure for oscillatory parameter identification. *IEEE - Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 4, p. 2049–2055, November 1994.

WANG, C.; DOU, C.-X.; LI, X.-B.; JIA, Q.-Q. A wams/pmu based fault location technique. *Elsevier - Electric Power Systems Research*, v. 77, n. 8, p. 936–945, June 2007.

WIES, R. W.; PIERRE, J. W.; TRUDNOWSKI, D. Use of arma block processing for estimating stationary low-frequency electromechanical modes of power systems. *IEEE - Transactions on Power Systems*, v. 18, n. 1, p. 167–173, February 2003.

XIAO, J.; XIE, X.; HAN, Y.; WU, J. Dynamic tracking of low-frequency oscillations with improved prony method in wide-area measurement system. *IEEE - Power Engineering Society General Meeting*, p. 1104–1109, June 2004.

XIE, X.; XIN, Y.; XIAO, J.; WU, J.; HAN, Y. Wams applications in chinese power system. *IEEE - power & energy magazine*, v. 1, p. 54–63, June 2006.

YI, K.; CHOO, J.; YOON, S.; LEE, T.; PARK, B.; NAM, H.; SONG, S.; SHIM, K. Development of wide area measurement and dynamic security assessment systems in korea. *IEEE - power Power Engineering Society Summer Meeting*, v. 3, p. 1495–1499, 2001.

YINGTAO, W.; YONGHUA, Y.; JUNXIAN, H. Coordinated out-of-step protection system based on wams. *IEEE/PES - Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, 2005.

YUAN, Y.; JU, P.; LI, Q.; WANG, Y.; HU, H.; SASAKI, H. A real-time monitoring method for power system steady state angle stability based on wams. *IEEE - The 7th International Power Engineering Conference*, v. 2, p. 761–764, December 2005.

ZEXIANG, D. J. C. State estimation with phasor measurements. *IEEE/PES - Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, p. 1–5, 2005.

ZHAO, H. A new state estimation model of utilizing pmu measurements. *IEEE - Transactions on Power System*, p. 233–240, February 2006.

ZHOU, M.; CENTENO, V.; THORP, J.; PHADKE, A. An alternative for including phasor measurements in state estimators. *IEEE - Transactions on Power System*, v. 21, n. 4, p. 1930–1937, November 2006.