



IDENTIFICAÇÃO DE MODOS ELETROMECAÑICOS E FORMAS MODAIS
UTILIZANDO DADOS SINCRONIZADOS

Thassiana Batista Costa

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Glauco Nery Taranto

Tatiana Mariano Lessa de Assis

Rio de Janeiro

Março de 2014

IDENTIFICAÇÃO DE MODOS ELETROMECAÑICOS E FORMAS MODAIS
UTILIZANDO DADOS SINCRONIZADOS

Thassiana Batista Costa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.

Profa. Tatiana Mariano Lessa de Assis, D.Sc.

Dr. Sergio Gomes Junior, D.Sc.

Prof. Paulo César Pellanda, Dr. ENSAE

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2014

Costa, Thassiana Batista

Identificação de Modos Eletromecânicos e Formas Modais Utilizando Dados Sincronizados/Thassiana Batista

Costa. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XVI, 90 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Glauco Nery Taranto

Tatiana Mariano Lessa de Assis

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 88 – 90.

1. Prony. 2. Modos Eletromecânicos. 3. CSD.
4. PSD. 5. *Power-Spectral Density*. 6. *Cross-Spectral Density*. 7. *Mode-Shapes*. 8. Formas Modais. I. Taranto, Glauco Nery *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Aos meus pais Dilda e
Washington, ao meu irmão
Luizinho e às minhas avós Ana
(in memoriam) e Alzira
(in memoriam).*

Agradecimentos

À Deus, por me conceder esta oportunidade profissional e por me cercar de pessoas especiais, que foram importantes para mim.

Aos meus pais, pelo amor incondicional. Por me apoiarem em todas as minhas decisões e serem tão presentes. Vocês possibilitaram a realização deste trabalho, ainda que meus objetivos tenham acarretado a privação dos seus. Este título é fruto da confiança de vocês em mim. Eu amo vocês!

Ao meu irmão, quem eu pude contar plenamente em todos os momentos difíceis e pude dividir momentos bons. Você não se revelou apenas um irmão mais velho, mas também se posicionou como um pai. Obrigada por cuidar de mim e, principalmente, por acreditar na minha capacidade, como nossos pais.

Ao querido amigo Rodrigo Mello, por ter me recebido tão bem em sua casa e ter tornado os meus dias tão agradáveis e divertidos. Sou muito grata por tudo o que fez e continua fazendo por mim.

Ao estimado Frei Florival Mariano, por me encorajar a encarar o mestrado longe de casa. Obrigada por cada ensinamento e por todas as orações.

Aos meus orientadores Glauco e Tatiana, sou grata pela confiança ao me aceitarem como aluna, pelas sugestões imprescindíveis no curso deste trabalho e por todas as oportunidades dadas neste período. Vocês contribuíram muito com meu amadurecimento pessoal e profissional. Ao Glauco, especialmente, pela paciência com o ritmo do meu passo.

À engenheira Mariana Rampinelli, por ter sido tão completa como amiga. Por ter me doado seu tempo e seu carinho para me escutar e me ajudar diretamente,

desde às minhas questões pessoais aos meus problemas técnicos no desenvolvimento do meu trabalho.

Ao engenheiro Eurípedes Rocha, um grande amigo que tornou meus momentos de desenvolvimento da dissertação mais divertidos. Obrigada pela ajuda técnica, por esclarecer minhas dúvidas ou me deixar com mais dúvidas, mas sempre me fazendo sair do lugar.

Ao amigo e engenheiro Luiz Eduardo, pelo incentivo para que eu fizesse o mestrado na COPPE e pelo fiel companheirismo nestes anos de trabalho.

Ao amigo e engenheiro Carlos Oyarce, por toda ajuda e boa vontade enquanto estive próximo de mim no início do mestrado.

Ao engenheiro Thiago Jeremias, por responder solícitamente aos meus e-mails, elucidando-me dúvidas acerca de seu trabalho, mesmo sem me conhecer.

Aos amigos do LASPOT, pelo animado ambiente de trabalho. Cada um contribuiu de maneira especial com meu bem estar.

Thassiana Batista da Costa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

IDENTIFICAÇÃO DE MODOS ELETROMECAÑICOS E FORMAS MODAIS
UTILIZANDO DADOS SINCRONIZADOS

Thassiana Batista Costa

Março/2014

Orientadores: Glaucó Nery Taranto

Tatiana Mariano Lessa de Assis

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta uma análise de desempenho de dois métodos de identificação de oscilações eletromecânicas, aplicados em um sistema de energia elétrica, a partir de dados de medições de sinais sincronizados. O Método de Prony é usado para estimação das propriedades modais, tais como amortecimento, frequência e forma modal de um dado modo eletromecânico. Os Métodos CSD (*Cross-Spectral Density*) e PSD (*Power-Spectral Density*) são analisados em conjunto e apresentam uma abordagem de processamento de sinais para estimar as formas modais dos modos do sistema em questão. A abordagem básica de cada método é apresentada, bem como os exemplos que incluem resultados de simulações para diferentes tipos de distúrbios em sistemas-teste.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

IDENTIFICATION OF ELECTROMECHANICAL MODES AND MODAL
FORMS UTILIZING SYNCHRONIZED DATA

Thassiana Batista Costa

March/2014

Advisors: Glauco Nery Taranto

Tatiana Mariano Lessa de Assis

Department: Electrical Engineering

This work presents a performance evaluation of two methods utilized in the identification of power system electromechanical modes considering synchronized phasor measurements. The Prony method is first used to estimate modal properties, like damping, frequency and mode shape of a given electromechanical mode. Secondly, the signal processing methods CSD (Cross-Spectral Density) and PSD (Power-Spectral Density) are jointly evaluated for the estimation of electromechanical mode shapes. The basic concepts of each method are presented and their performances are evaluated in some test systems with ringdown disturbances.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
2 Teoria Básica Utilizada	5
2.1 Análise Modal	5
2.1.1 Estabilidade Eletromecânica em Sistemas Elétricos de Potência	5
2.1.2 Equações de Estado	6
2.1.3 Autovalores e Autovetores	7
2.1.4 Observabilidade	9
2.1.5 Fatores de Participação	9
2.1.6 Formas Modais ou <i>Mode-Shapes</i>	10
2.1.7 Resíduos da Função de Transferência	11
2.2 Método de Prony	12
2.2.1 Formas Modais via Método de Prony	15
2.3 Métodos PSD e CSD	17
2.3.1 Formas Modais via Métodos PSD e CSD	17
3 Resultados	21
3.1 Resultados do Método de Prony	23
3.1.1 Sistema Sintético	23

3.1.1.1	Reconstituição de um Sinal Didático pelo Método de Prony	23
3.1.1.2	Estimação das Formas Modais a partir da Matriz de Estados	25
3.1.1.3	Estimação das Formas Modais a partir dos Resíduos	26
3.1.2	Sistema Duas Áreas	28
3.1.2.1	Pequenas Perturbações	29
3.1.2.2	Grandes Perturbações	31
3.1.2.3	Efeitos das Janelas de Simulações Reduzidas sobre o Método de Prony	32
3.1.2.4	Efeitos dos Ruídos sobre o Método de Prony	33
3.1.3	Sistema <i>Brazilian Birds</i>	34
3.1.3.1	Avaliação da Precisão do Método de Prony	35
3.1.4	Sistema <i>New England</i>	41
3.1.4.1	Degrau na Tensão de Referência dos Geradores	42
3.1.4.2	Estimação das Formas Modais pelo cálculo dos Resíduos	44
3.2	Resultados dos Métodos PSD e CSD na Estimação das Formas Modais	52
3.2.1	Sistema Duas Áreas	52
3.2.1.1	Perturbações nos Sinais de Referência dos Reguladores de Tensão	52
3.2.1.2	Curto-Circuito	59
3.2.2	Sistema <i>New England</i>	68
3.2.2.1	Degrau na Tensão de Referência	68
3.2.2.2	Degrau na Potência Mecânica dos Geradores	77
4	Conclusões e Trabalhos Futuros	84
	Referências Bibliográficas	88

Lista de Figuras

3.1	Resposta livre do Sistema Sintético.	23
3.2	Resposta livre do Sistema Sintético e Aproximação de Prony.	27
3.3	Formas modais de velocidade do Sistema Sintético.	27
3.4	Forma modal de velocidade do Sistema Sintético estimada a partir do cálculo dos Resíduos.	36
3.5	Diagrama unifilar do Sistema Duas Áreas.	37
3.6	Formas modais de velocidade fornecidos pelo programa PacDyn	37
3.7	Sistema <i>Brazilian Birds</i>	38
3.8	Diagrama unifilar do Sistema <i>New England</i>	41
3.9	Formas modais de velocidade do Caso 1 - modo 0,5854 Hz	45
3.10	Formas modais de velocidade do Caso 2 - modo 1,4256 Hz	45
3.11	Formas modais de velocidade do Caso 3 - modo 0,9200 Hz	47
3.12	Formas modais de velocidade do Caso 4 - modo 1,3957 Hz	48
3.13	Formas modais de velocidade do Caso 5 - modo 0,9982 Hz	48
3.14	Formas modais de velocidade do Caso 6 - modo 1,3692 Hz	49
3.15	Formas modais de velocidade do Caso 7 - modo 1,1056 Hz	49
3.16	Formas modais de velocidade do Caso 8 - modo 1,1982 Hz	50
3.17	Formas modais de velocidade do Caso 9 - modo 1,1281 Hz	51
3.18	Curvas de velocidades dos geradores - Testes com perturbações nos reguladores de velocidades	54
3.19	Caso 1 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 1 (0,6825 Hz).	56

3.20	Caso 1 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD - Modo 1 (0,6825 Hz).	57
3.21	Caso 1 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 2 (1,1383 Hz).	57
3.22	Caso 1 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD - Modo 2 (1,1383 Hz).	58
3.23	Caso 1 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 3 (1,2743 Hz).	58
3.24	Caso 1 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD - Modo 3 (1,2743 Hz).	59
3.25	Caso 2 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 1 (0,6825 Hz).	59
3.26	Caso 2 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 2 (1,1383 Hz).	60
3.27	Caso 2 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 3 (1,2743 Hz).	60
3.28	Caso 3 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 1 (0,6825 Hz).	61
3.29	Caso 3 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 2 (1,1383 Hz).	61
3.30	Caso 3 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 3 (1,2743 Hz).	62
3.31	Curvas de velocidade dos geradores - Testes com curtos-circuitos . . .	62
3.32	Formas modais de velocidade do Caso 4	64
3.33	Formas modais de velocidade do Caso 5	66
3.34	Formas modais de velocidade do Caso 6	67
3.35	Formas modais de velocidade do Caso 1 - modo 0,5854 Hz	69
3.36	Caso 1 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.	70

3.37 Formas modais de velocidade do Caso 2 - modo 1,4256 Hz	71
3.38 Caso 2 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.	71
3.39 Formas modais de velocidade do Caso 3 - modo 0,9200 Hz	72
3.40 Caso 3 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.	72
3.41 Formas modais de velocidade do Caso 4 - modo 1,3957 Hz	73
3.42 Caso 4 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.	73
3.43 Formas modais de velocidade do Caso 5 - modo 0,9982 Hz	74
3.44 Caso 5 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.	74
3.45 Formas modais de velocidade do Caso 6 - modo 1,3692 Hz	75
3.46 Caso 6 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.	76
3.47 Formas modais de velocidade do Caso 7 - modo 1,1056 Hz	76
3.48 Caso 7 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.	78
3.49 Formas modais de velocidade do Caso 8 - modo 1,1982 Hz	78
3.50 Caso 8 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.	79
3.51 Formas modais de velocidade do Caso 9 - modo 1,1281 Hz	79
3.52 Caso 9 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.	82
3.53 Formas modais de velocidade do Caso 10 - modo 0,9982 Hz	82
3.54 Curvas de velocidades dos geradores #G4, #G5, #G7 e #G10.	83
3.55 Formas modais de velocidade do Caso 11 - modo 1,1281 Hz	83

Lista de Tabelas

3.1	Valores das formas modais estimadas pelo Método de Prony a partir do cálculo dos Resíduos	26
3.2	Modos eletromecânicos do Sistema Duas Áreas fornecidos pelo programa PacDyn.	28
3.3	Informações dos módulos e ângulos das formas modais do Sistema Duas Áreas fornecidas pelo do PacDyn.	28
3.4	Resultado do Método de Prony para o Caso 1.	29
3.5	Resultado do Método de Prony para o Caso 3.	29
3.6	Resultado do Método de Prony para os Casos 4, 5 e 6.	31
3.7	Resultado do Método de Prony para o Caso 7.	32
3.8	Simulação do Caso 7 com a Janela de Simulação reduzida.	33
3.9	Modos eletromecânicos identificados de sinais com ruído.	34
3.10	Modos Eletromecânicos do Sistema <i>Brazilian Birds</i>	35
3.11	Resultado do Método de Prony para o Teste 1 - Curto-circuito em Canário.	36
3.12	Média dos Desvios - Teste 1.	39
3.13	Resultado do Método de Prony para o Teste 2 - Curto-circuito em Curió.	40
3.14	Média dos Desvios - Teste 2.	40
3.15	Modos eletromecânicos do Sistema <i>New England</i>	42
3.16	Valores das formas modais fornecidos pelo PacDyn dos Modos 1, 2 e 3.	43
3.17	Valores das formas modais fornecidos pelo PacDyn dos Modos 4, 5 e 6.	43

3.18	Valores das formas modais fornecidos pelo PacDyn dos Modos 7, 8 e 9.	46
3.19	Caso 1 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 1 (0,5854 Hz).	46
3.20	Caso 2 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 2 (1,4256 Hz).	46
3.21	Caso 3 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 3 (0,9200 Hz).	47
3.22	Caso 4 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 4 (1,3957 Hz).	47
3.23	Caso 5 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 5 (0,9982 Hz).	47
3.24	Caso 6 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 6 (1,3692 Hz).	48
3.25	Caso 7 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 7 (1,1056 Hz).	49
3.26	Caso 8 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 8 (1,1982 Hz).	50
3.27	Caso 9 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 9 (1,1281 Hz).	50
3.28	Modo 1 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD <i>versus</i> PacDyn	69
3.29	Modo 2 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD <i>versus</i> PacDyn	70
3.30	Modo 3 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD <i>versus</i> PacDyn	71
3.31	Modo 4 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD <i>versus</i> PacDyn	73
3.32	Modo 5 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD <i>versus</i> PacDyn	74

3.33	Modo 6 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD <i>versus</i>	
	PacDyn	75
3.34	Modo 7 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD <i>versus</i>	
	PacDyn	76
3.35	Modo 8 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD <i>versus</i>	
	PacDyn	77
3.36	Modo 9 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD <i>versus</i>	
	PacDyn	77
3.37	Modo 10 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD <i>versus</i>	
	PacDyn	80
3.38	Modo 11 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD <i>versus</i>	
	PacDyn	81

Capítulo 1

Introdução

A demanda de energia elétrica tem aumentado muito nos últimos anos com o avanço tecnológico e o crescimento populacional. Este cenário tem apresentado dificuldades crescentes tanto na forma de produção como no uso de energia, frente à uma sociedade cada vez mais dependente deste serviço e intolerante a interrupções. Sendo assim, existe uma grande necessidade de reestruturação e modernização do setor elétrico e, conseqüentemente, melhorias nas condições de operação do sistema.

Dentre as variadas iniciativas em prol da melhoria dos sistemas de medição em sistemas de potência, a medição sincronizada de fasores, ou sincrofasores, vem se destacando entre as técnicas de medidas pesquisadas. Os sincrofasores propõem uma inovação na aquisição de medidas nos sistemas elétricos, principalmente no que diz respeito à possibilidade da medição direta do ângulo de fase das grandezas de estado, possibilitando um entendimento mais preciso do sistema de potência [1].

Os sincrofasores podem ser usados para monitoração online dos modos de oscilação do sistema. A velocidade de transmissão de dados amostrados por este tipo de medição, associada às aplicações de técnicas de identificação de sistemas, viabilizam a detecção de modos eletromecânicos mal amortecidos em um breve intervalo de tempo que, em alguns casos, pode ser considerado tempo real.

Isso permite a monitoração dos polos dominantes do sistema em tempo real nos centros de operação. Desta maneira, medidas corretivas e preventivas podem ser providenciadas pelos operadores do sistema de modo a impedir o aumento das

oscilações que possam causar instabilidade e blecautes [2].

Vislumbrando a segurança do sistema elétrico, atualmente são estudados algoritmos de monitoração das oscilações que sejam capazes de estimar o nível de amortecimento dos modos do sistema e acompanhar as variações das taxas de amortecimento em tempo real. Neste contexto, Tashman *et al.* [3] classifica a análise das oscilações baseada em dados de medição em três tipos, dos quais dois são de interesse deste trabalho: Ambiente e *RingDown*. Dados Ambiente são obtidos quando o sistema se encontra em condição de equilíbrio, sofrendo apenas perturbações de baixa intensidade devido às variações aleatórias da carga. Já o *RingDown*, ocorre após o sistema sofrer um distúrbio que excite um modo do sistema, provocando oscilação.

Vários trabalhos abordam diversos métodos de estimação das propriedades modais de um sistema, no que tange às informações de frequência e amortecimento.

Em [4], Liu apresenta o Método de Prony para estimação de modos eletromecânicos, bem como seus valores de frequência, amortecimento e formas modais (*mode-shapes*). A análise Prony em aplicações de sistemas de potência é um desafio pelo fato das respostas do sistema de energia conterem fenômenos com linearidades e não linearidades, além da presença de ruídos, que podem interferir na precisão dos resultados. Hauer [5] apresenta um modelo que pode ser composto pela combinação de polos e resíduos, que constituem uma decomposição modal de um sinal. Prioste [6] interpreta ainda este sinal como uma aproximação de um somatório de exponenciais amortecidas.

Liu [4], Hauer [5] e Trudnowski [7] apresentam uma formulação do Método de Prony para aplicação em múltiplos sinais e Jeremias [8] mostra esta formulação como caminho para o cálculo das formas modais de um sistema.

Prioste *et al.* [2] e Jeremias [8] apontam algumas peculiaridades do método, tais como:

- Sensibilidade do método a ruídos - é sugerido por todos os autores um procedimento de filtragem no sinal antes da aplicação do método.
- Melhorias na estimação dos modos quando são usadas janelas de simulação

reduzidas.

- Definição da ordem do modelo - Jeremias [8] sugere que a ordem do modelo seja um quarto do total do número de amostras do sinal e os demais autores sugerem apenas a metade deste total de mostras.
- Dificuldades na identificação de autovalores com valores de frequência de oscilação próximas - Prioste [6] sugere o cálculo do índice de dominância modal para a ordenação dos autovalores de acordo com suas energias modais.

Prioste *et al.* [2] ressalta a importância de uma alta observabilidade modal na identificação de oscilações eletromecânicas e exemplifica casos em que uma alta observabilidade local dificulta a identificação de um modo interáreas.

Em [9] é levada em consideração a forma modal eletromecânica e é realizada uma ligação teórica entre as propriedades espectrais e a propriedade do autovetor do sistema. Trudnowski *et al.* [10] propõe a estimação das formas modais de um sistema a partir do cálculo das densidades espectrais de potência e cruzada.

A aplicação prática dos métodos de identificação, como o Método de Prony e os métodos baseados em processamento de sinais, é permitir a análise modal a partir de dados de medição.

Objetivos

O objetivo desta dissertação é analisar dados provenientes de distúrbios *Ring-Down*, e procedentes de sincrofasores, para estimar as propriedades modais de um sistema elétrico de energia (SEE). Estes sinais, quando comparados aos Dados Ambiente, possuem uma melhor relação sinal-ruído, oscilações maiores e mais bem definidas e, portanto, suas propriedades modais são mais fáceis de serem identificadas. Sendo assim, a dissertação também tem como objetivo a expansão da aplicação de métodos baseados em densidade espectral, conforme proposto em [9], para análise de dados oriundos de distúrbios *RingDown*.

O Método de Prony é direcionado para aplicações em dados *RingDown*. Os

métodos baseados em densidade espectral são direcionados para Dados Ambiente. Tanto nos testes com aplicações do Método de Prony, quanto nos testes baseados em densidade espectral, são apresentadas simulações em sinais procedentes de distúrbios *RingDown*, que foram categorizados como pequenas perturbações e grandes perturbações. Em pequenas perturbações, estão os resultados dos degraus aplicados nas tensões de referência e nas potências mecânicas dos geradores de um sistema-teste. Já em grandes perturbações, estão os resultados dos curtos-circuitos aplicados em diferentes barras de um sistema-teste.

Estrutura do Trabalho

A dissertação está dividida em quatro capítulos. No Capítulo 2 são revistos alguns conceitos básicos associados à teoria de análise modal e são descritos os métodos utilizados para identificação modal: Prony, Densidade Espectral de Potência ou PSD (*Power-Spectral Density*) e Densidade Espectral Cruzada ou CSD (*Cross-Spectral Density*). Estes dois últimos são os métodos baseados em processamento de sinais. As simulações e os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 3, que por sua vez explora, no Método de Prony, casos de pequenas e grandes perturbações, efeitos causados pela redução das janelas de simulações, estudo de sinais com ruídos, precisão do método e estimações das formas modais. Nos métodos PSD e CSD são exploradas apenas as estimações das formas modais do sistema. Por fim, o Capítulo 4 mostra as conclusões do trabalho.

Publicação Relacionada ao Trabalho

Parte do desenvolvimento e dos resultados relacionados às técnicas baseadas em densidade espectral deste trabalho foi aceita para publicação e apresentação no V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2014:

- COSTA, T. B., TARANTO, G. N., ASSIS, T. M. L., “Estimação das Formas Modais em Sistemas de Energia Elétrica com Sinais Sincronizados”. Em: *V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2014.

Capítulo 2

Teoria Básica Utilizada

2.1 Análise Modal

2.1.1 Estabilidade Eletromecânica em Sistemas Elétricos de Potência

A estabilidade de um sistema de potência é a capacidade de um sistema elétrico de retornar a um estado de equilíbrio, após sofrer uma perturbação [11].

Existem diferentes tipos de perturbações. Mudanças na carga são exemplos de pequenas perturbações. O sistema elétrico deve ser capaz de se ajustar a estas mudanças na condição de operação e funcionar de forma satisfatória. Já um curto-circuito em uma linha de transmissão ou em outro componente do sistema, perda de um grande gerador, entre outros, são tipos de grandes perturbações. Nesta situação, as causas da falta devem ser eliminadas e o sistema elétrico deve estar preparado para alcançar uma nova condição de operação estável [12]. A estabilidade pode ser dividida em três classes: estabilidade angular, estabilidade de tensão e estabilidade de frequência.

A estabilidade de tensão é a capacidade que o sistema tem de manter os níveis de tensão dentro dos limites estabelecidos em todas as barras do sistema após sofrer uma perturbação. Os fenômenos de instabilidade de tensão são quase sempre não oscilatórios, diferentemente dos fenômenos de instabilidade angular [13].

A estabilidade de frequência é a capacidade que o sistema tem de manter a frequência nominal após sofrer uma grande perturbação causada por desequilíbrio entre carga e geração.

A estabilidade angular é a capacidade que o sistema tem de manter o sincronismo entre as máquinas após sofrer uma perturbação. Esta estabilidade pode ser entendida como o equilíbrio entre os conjugados eletromagnético e mecânico de cada máquina do sistema. Em regime permanente, esta estabilidade nada mais é do que a capacidade do rotor de se manter numa velocidade constante. Quando ocorre um distúrbio, os rotores das máquinas síncronas aceleram ou desaceleram. Como as respostas das máquinas são diferentes, surgem oscilações que devem ser amortecidas para que haja a estabilidade angular do rotor [8]. Por se tratar de características eletromecânicas do sistema, este é o tipo de estabilidade a ser considerada ao longo deste trabalho.

As oscilações eletromecânicas no sistema elétrico são peculiaridades das respostas transitórias do sistema a grandes ou pequenos distúrbios. Estas oscilações podem ser bem ou mal amortecidas. Oscilações mal amortecidas podem afetar a operação do sistema elétrico, bem como a qualidade da energia fornecida.

As frequências naturais das oscilações eletromecânicas situam-se na faixa de 0,1 a 2,5Hz e são classificadas conforme o modo de oscilação. Modos interáreas são caracterizados pela oscilação entre máquinas de regiões diferentes, e a sua frequência de oscilação está na faixa de 0,1 a 1Hz. Já os modos locais são caracterizados pela oscilação entre máquinas de uma mesma região e a sua frequência de oscilação está na faixa de 1 a 2Hz.

2.1.2 Equações de Estado

O sistema elétrico é representado por um conjunto de equações algébrico-diferencial não lineares. Na análise da estabilidade a pequenas perturbações, onde o estudo é feito em torno de um dado ponto de operação do sistema, é possível usar a linearização do conjunto de equações algébrico-diferencial. O resultado desta line-

arização é um sistema de equações algébrico-diferenciais lineares, onde as variáveis algébricas podem ser eliminadas por manipulação analítica transformando o sistema em equações puramente diferenciais ordinárias de primeira ordem, cuja formulação é denominada equações de estados. Tanto a forma de equações algébrico-diferenciais como as equações de estados favorecem a aplicação de ferramentas numéricas relacionadas à álgebra linear no estudo do comportamento do sistema dinâmico. A primeira formulação é mais eficiente computacionalmente, enquanto que a segunda é mais simples didaticamente e será usada em seguida.

Desta maneira, considere o sistema dinâmico representado por (2.1) e (2.2):

$$\dot{\underline{x}}(t) = \mathbf{A}\underline{x}(t) + \mathbf{B}\underline{u}(t) \quad (2.1)$$

$$\underline{y}(t) = \mathbf{C}\underline{x}(t) + \mathbf{D}\underline{u}(t) \quad (2.2)$$

onde \underline{x} , \underline{u} e \underline{y} são vetores de estado, controle e saída, respectivamente. \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{D} são matrizes de estado, controle, saída e transmissão direta, respectivamente. A ordem deste modelo corresponde ao número de estados representados.

2.1.3 Autovalores e Autovetores

Os autovalores de uma matriz \mathbf{A} são dados por valores de λ que satisfazem (2.3), que por sua vez é conhecida por equação característica de \mathbf{A} . O conjunto de raízes de (2.3) é denotado por λ [11].

$$|\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A}| = 0 \quad (2.3)$$

A matriz diagonal cujo elemento (i, i) é o autovalor λ_i da matriz \mathbf{A} é indicada por $\mathbf{\Lambda}$ [12].

Para cada autovalor λ_i existe um vetor coluna $\underline{\Phi}_i$ que satisfaz (2.4). $\underline{\Phi}_i$ é chamado

de autovetor à direita de \mathbf{A} associado ao autovalor λ_i .

$$\mathbf{A}\underline{\Phi}_i = \lambda_i\underline{\Phi}_i \quad (2.4)$$

De maneira análoga, para cada autovalor λ_i existe um vetor linha $\underline{\Psi}_i$ que satisfaz (2.5). $\underline{\Psi}_i$ é chamado de autovetor à esquerda de \mathbf{A} associado ao autovalor λ_i .

$$\underline{\Psi}_i\mathbf{A} = \lambda_i\underline{\Psi}_i \quad (2.5)$$

Os autovetores à direita e à esquerda são ortogonais, e seguem (2.6). O conjunto de $\underline{\Phi}_i$'s formam Φ e o conjunto de $\underline{\Psi}_i$'s formam Ψ .

$$\Psi\Phi = I \quad (2.6)$$

Seja a transformação de variáveis dada por (2.7):

$$\underline{x}(t) = \Phi\underline{z}(t) \quad (2.7)$$

e substituindo (2.7) em (2.1), tem-se (2.8), resultando em (2.9) e (2.10):

$$\Phi\dot{\underline{z}}(t) = \mathbf{A}\Phi\underline{z}(t) + \mathbf{B}\underline{u}(t) \quad (2.8)$$

$$\dot{\underline{z}}(t) = \Phi^{-1}\mathbf{A}\Phi\underline{z}(t) + \Phi^{-1}\mathbf{B}\underline{u}(t) \quad (2.9)$$

$$\dot{\underline{z}}(t) = \mathbf{\Lambda}\underline{z}(t) + \Psi\mathbf{B}\underline{u}(t) \quad (2.10)$$

Assim, as equações diferenciais que formam a equação de estado se tornam desacopladas, resultando em um sistema de n equações diferenciais de primeira ordem

da forma [12]:

$$\dot{z}(t)_i = \lambda_i z_i(t) + \underline{\Psi}_i \mathbf{B} \underline{u}(t) \quad (2.11)$$

Reescrevendo (2.7), tem-se:

$$\underline{x}(t) = \sum_{i=1}^n \underline{\Phi}_i z_i(t) \quad (2.12)$$

2.1.4 Observabilidade

Um sistema é dito observável se, em um instante t_0 , for possível determinar o estado $x(t_0)$ a partir da observação da saída durante um intervalo de tempo finito [14].

A equação (2.13) define \mathbf{C}' como matriz de observabilidade modal.

$$\mathbf{C}' = \Phi \mathbf{C} \quad (2.13)$$

Pode-se notar por (2.13) que a observabilidade está diretamente relacionada aos autovetores à direita de \mathbf{A} .

Sendo assim, a forma modal corresponde à visualização dos fatores de observabilidade de um subconjunto de variáveis de estado do sistema para um determinado modo, ou seja, os fatores de observabilidade para \mathbf{C} igual à matriz identidade [12].

2.1.5 Fatores de Participação

O fator de participação é a quantificação da sensibilidade de cada variável de estado em relação a um dado modo de oscilação. Vale lembrar, que os modos de oscilações são os autovalores da matriz \mathbf{A} .

Seja a matriz de participação definida como \mathbf{P} , cujos elementos são calculados conforme equação (2.14). O elemento p_{ij} é a participação da variável x_i no modo λ_j .

$$p_{ij} = v_{ij} \cdot w_{ji} \quad (2.14)$$

onde v e w são os autovetores à direita e à esquerda, respectivamente, da matriz \mathbf{A} .

Na análise das formas modais, considera-se na matriz de participação somente as colunas referentes aos autovalores complexos, ou seja, que representam um modo de oscilação, e as linhas de variáveis de interesse como, por exemplo, variável de ângulo ou velocidade.

Os valores das participações dos modos relevantes na análise dinâmica são mais significativos quando comparados aos valores das participações dos modos irrelevantes, facilitando muito a análise modal.

2.1.6 Formas Modais ou *Mode-Shapes*

Conforme mostrado em (2.7), é possível expressar a resposta do sistema em termos dos vetores de estados $\underline{x}(t)$ e $\underline{z}(t)$, que estão relacionados da seguinte forma:

$$\underline{x}(t) = [\underline{\Phi}_1 \ \underline{\Phi}_2 \ \dots \ \underline{\Phi}_n] \underline{z}(t) \quad (2.15)$$

As variáveis x_1, x_2, \dots, x_n são as variáveis de estados originais cuja escolha representa o desempenho dinâmico do sistema. As variáveis z_1, z_2, \dots, z_n são as variáveis de estado transformadas de forma que cada variável está associada a um autovalor ou modo.

A partir da equação (2.15), verifica-se que o autovetor à direita fornece a forma modal, isto é, informa sobre o comportamento de todas as variáveis de estado quando um determinado modo é excitado. O grau de atividade da variável de estado x_k no modo i é dado pelo elemento Φ_{ki} do autovetor à direita Φ_i .

O módulo dos elementos de Φ_i fornece o grau de atividade das n variáveis de estado no modo i e o ângulo dos elementos de Φ_i fornece a defasagem angular das variáveis de estado em relação ao modo.

Neste sentido, a análise das formas modais permite a visualização da amplitude e da fase de um modo de oscilação quando se avalia um mesmo tipo de variável de saída, como por exemplo a velocidade angular [12].

2.1.7 Resíduos da Função de Transferência

Ao aplicar a Transformada de Laplace nas equações (2.1) e (2.2), pode-se obter uma relação entre a entrada e saída do sistema no domínio s , como segue:

$$\begin{aligned} s\underline{X}(s) &= \mathbf{A}\underline{X}(s) + \mathbf{B}\underline{U}(s) \\ (s\mathbf{I} - \mathbf{A})\underline{X}(s) &= \mathbf{B}\underline{U}(s) \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\underline{X}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}\underline{U}(s)$$

$$\underline{Y}(s) = \mathbf{C}\underline{X}(s) + \mathbf{D}\underline{U}(s) \quad (2.17)$$

Substituindo (2.16) em (2.17), tem-se:

$$\underline{Y}(s) = [\mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}]\underline{U}(s) \quad (2.18)$$

Supondo que o sistema é monovariável (SISO), pode-se definir:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2.19)$$

A equação (2.19) pode ser reescrita como:

$$G(s) = \frac{b_0s^n + b_1s^{n-1} + \dots + b_{n-1}s + b_n}{s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n} \quad (2.20)$$

Fatorando o numerador e o denominador, a equação (2.20) pode ser reescrita na forma de zeros e polos:

$$G(s) = K \frac{(s + z_1)(s + z_2) \cdots (s + z_n)}{(s + p_1)(s + p_2) \cdots (s + p_n)} \quad (2.21)$$

onde z_1, z_2, \dots, z_n são zeros de $G(s)$ e p_1, p_2, \dots, p_n , os polos, que também podem ser denotados por λ . Expandindo em frações parciais, a equação (2.21) pode ser

reescrita na forma de resíduos e polos:

$$G(s) = \frac{R_1}{s + \lambda_1} + \frac{R_2}{s + \lambda_2} + \dots + \frac{R_n}{s + \lambda_n} \quad (2.22)$$

onde R_1, R_2, \dots, R_n são os resíduos da função de transferência $G(s)$, associados aos polos $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, respectivamente.

A equação (2.22) pode ser representada no domínio do tempo e no domínio discreto conforme (2.23) e (2.24), respectivamente:

$$g(t) = \sum_{i=1}^n R_i e^{\lambda_i t} \quad (2.23)$$

$$g(k) = \sum_{i=1}^n R_i q_i^k \quad (2.24)$$

onde n é a ordem do modelo, $k = 0, 1, \dots, (N - 1)$, N é o total de pontos do intervalo observado, $q_i = e^{\lambda_i \Delta t}$ e Δt é o intervalo de amostragem.

No estudo da identificação de modos eletromecânicos, os resíduos indicam quais modos dominam de fato a resposta identificada. De uma maneira geral, nos sistemas de potência, os polos de alta frequência e bem amortecidos possuem valores de resíduos insignificantes em relação aos resíduos dos modos eletromecânicos.

2.2 Método de Prony

O Método de Prony [4, 5, 15, 6] foi desenvolvido pelo francês Gaspard Riche, barão de Prony, no século XVIII e é um dos métodos mais usados nos estudos das oscilações eletromecânicas. Esta metodologia é capaz de estimar diretamente as informações de amortecimento, frequência, amplitude e fase das componentes modais existentes nos sinais analisados.

A metodologia de Prony propõe que um sinal seja representado por uma soma de exponenciais complexas amortecidas, pela estimação do número de exponenciais,

dos expoentes e de eventuais coeficientes ponderadores, conforme equação (2.25).

$$y(t) = \sum_{i=1}^n e^{\sigma_i t} A_i \cos(2\pi f_i t + \phi_i) = \sum_{i=1}^n R_i e^{\lambda_i t} \quad (2.25)$$

onde σ , f , A e ϕ são o coeficiente de amortecimento, a frequência, a amplitude e a fase da componente i do sinal y , nesta ordem, para $i = 1, 2, \dots, n$.

Como estes sinais podem ser oriundos de sinais sincronizados, os modelos utilizados são discretos, conforme equação (2.24), que pode ser reescrita na forma matricial pela equação (2.26) [4]:

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ q_1 & q_2 & \cdots & q_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_1^{N-1} & q_2^{N-1} & \cdots & q_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

onde q_i 's são raízes do polinômio que satisfazem a equação (2.27) de ordem n , cujos coeficientes a_i são desconhecidos.

$$q^n - (a_1 q^{n-1} + a_2 q^{n-2} + \cdots + a_n q^0) = 0 \quad (2.27)$$

O desenvolvimento matemático que prova a passagem da equação (2.26) para a equação (2.27), pode ser encontrado em [16] e [21].

Multiplicando-se a equação (2.26) por $\begin{bmatrix} -a_n & -a_{n-1} & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$ à esquerda, tem-se:

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} -a_n & -a_{n-1} & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \\
& \begin{bmatrix} -a_n & -a_{n-1} & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ q_1 & q_2 & \dots & q_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_1^{N-1} & q_2^{N-1} & \dots & q_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (2.28)
\end{aligned}$$

Repare que o lado direito da equação (2.28) satisfaz a equação (2.27) e, então, pode-se reescrevê-la:

$$\begin{bmatrix} -a_n & -a_{n-1} & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.29)$$

$$-a_n y(0) - a_{n-1} y(1) - \dots - a_1 y(n-1) + 1y(n) = 0 \quad (2.30)$$

Utilizando-se o mesmo artifício matemático, multiplica-se a equação (2.28) por $\begin{bmatrix} 0 & -a_n & -a_{n-1} & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$ à esquerda [4, 15] e tem-se:

$$\begin{bmatrix} 0 & -a_n & -a_{n-1} & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.31)$$

$$-a_n y(1) - a_{n-1} y(2) - \dots - a_1 y(n) + 1y(n+1) = 0 \quad (2.32)$$

A partir das equações (2.30) e (2.32), pode-se escrever a equação (2.33):

$$\begin{bmatrix} y(n) \\ y(n+1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(n-1) & y(n-2) & \cdots & y(0) \\ y(n) & y(n-1) & \cdots & y(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-2) & y(N-3) & \cdots & y(N-n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Agora o Método de Prony pode ser resumido nas seguintes etapas:

1. Calcule os coeficientes a_i 's solucionando a equação (2.33);
2. Calcule os coeficientes q_i 's solucionando a equação (2.27);
3. Calcule os coeficientes R_i 's solucionando a equação (2.26).

2.2.1 Formas Modais via Método de Prony

O Método de Prony permite identificar os coeficientes do polinômio do denominador da função de transferência de um sistema, a partir de uma curva ou sinal de entrada. Isso possibilita que os modos de oscilação sejam extraídos com facilidade a partir dos polos desta função de transferência.

Sendo assim, considera-se que $Y(k)$ são os dados medidos e que N é o número amostras. Na metodologia de Prony, a ordem do modelo n é desconhecida e alguns autores [8, 17] orientam a utilização da aproximação $n \approx N/4$, uma ordem elevada.

Para o cálculo das formas modais (ou *mode-shapes*) são utilizados os resíduos. Pela equação (2.22) pode-se notar facilmente que para cada autovalor existe um resíduo associado. Em geral, os módulos dos resíduos dos modos eletromecânicos são maiores do que os módulos dos resíduos dos outros polos que não são modos eletromecânicos, facilitando ainda mais a identificação dos modos de baixa frequência e mal-amortecidos.

Como a medida das formas modais é relativa, deve-se usar o Método de Prony Multissinais [7]. Ou seja, deve-se ter dados de mais de uma curva do sistema, como

por exemplo, curvas de velocidade de todos os geradores.

Para se obter os valores dos vetores das formas modais de um dado modo, deve-se coletar o valor do resíduo correspondente ao modo de interesse, e atribuí-lo, por exemplo, ao gerador da curva em análise.

O procedimento de Prony Multissinais pode ser equacionado por (2.34), a partir da equação (2.26) [4]:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ q_1 & q_2 & \cdots & q_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_1^{N-1} & q_2^{N-1} & \cdots & q_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(0) & y_2(0) & \cdots & y_m(0) \\ y_1(1) & y_2(1) & \cdots & y_m(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_1(N-1) & y_2(N-1) & \cdots & y_m(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1^{(1)}(0) & R_1^{(2)}(0) & \cdots & R_1^{(m)}(0) \\ R_2^{(1)}(1) & R_2^{(2)}(1) & \cdots & R_2^{(m)}(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_n^{(1)}(N-1) & R_n^{(2)}(N-1) & \cdots & R_n^{(m)}(N-1) \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

A equação (2.34) mostra diversos sinais de entrada do Método de Prony empilhados [8], $y_j(t)$ com $j = 1, 2, \dots, m$. Para cada curva existe identificação dos polos do sistema e seus respectivos resíduos. E para cada polo são determinados m resíduos.

A equação (2.33) pode ser reescrita:

$$\begin{bmatrix} y_1(n) \\ y_1(n+1) \\ \vdots \\ y_1(N-1) \\ [\vdots] \\ y_m(n) \\ y_m(n+1) \\ \vdots \\ y_m(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(n-1) & y_1(n-2) & \cdots & y_1(0) \\ y_1(n) & y_1(n-1) & \cdots & y_1(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_1(N-2) & y_1(N-3) & \cdots & y_1(N-n-1) \\ [\vdots] & [\vdots] & [\vdots] & [\vdots] \\ y_m(n-1) & y_m(n-2) & \cdots & y_m(0) \\ y_m(n) & y_m(n-1) & \cdots & y_m(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_m(N-2) & y_m(N-3) & \cdots & y_m(N-n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

A partir da equação (2.35) pode-se notar que são estimados somente n coeficientes a_i 's. Sendo assim, os passos para obtenção dos parâmetros de Prony, para um único sinal, podem ser repetidos para Prony Multissinais.

O autor de [6] ressalta que, por construção, o Método de Prony apresentado é incapaz de identificar sinais que contenham polos repetidos ou que apresentem polos próximos uns aos outros, com diferença inferior a 0,2 Hz entre eles, por exemplo.

2.3 Métodos PSD e CSD

2.3.1 Formas Modais via Métodos PSD e CSD

É conhecido que as formas modais são os autovetores à direita da matriz de estados \mathbf{A} . No entanto, quando não se conhece o sistema, nem suas matrizes de estados, e se só tem acesso aos dados de medição de um sistema de potência, como por exemplo, dados de ângulo ou de velocidade, é necessária uma abordagem alternativa na identificação destas formas modais. Sendo assim, é apresentado um conceito de processamento de sinais para estimar estes modos.

Densidade Espectral de Potência ou PSD (*power-spectral density*) pode ser en-

tendida como a potência de um sinal distribuída na frequência e é definida como sendo o quadrado da magnitude da Transformada de Fourier do sinal.

Em sistemas de energia, tendo em vista o cálculo das formas modais, a PSD é a quantificação da observabilidade do modo no sinal medido, que no caso desta dissertação está na velocidade dos geradores. Pode-se dizer que o gerador que possuir maior valor de PSD na frequência (ou modo) de interesse é o gerador que possui maior observabilidade e, portanto, este é o gerador que deve ser escolhido como referência.

Densidade Espectral Cruzada ou CSD (*cross-spectral density*) pode ser entendida como a correlação entre dois sinais temporais distribuídos na frequência e é definida como sendo a diferença angular entre as tensões de uma barra qualquer e a barra de referência, em se tratando de sistemas de potência. Na aplicação de formas modais, a CSD fornece nada mais do que a fase entre os geradores num dado modo.

Na prática, a PSD é uma CSD, e isso será mostrado a seguir.

A equação (2.36) [9] é a função CSD, onde S_{kl} é o valor de densidade espectral cruzada entre os sinais Y_k e Y_l na frequência ω , T é o período de observação do sinal e E é o operador esperança. Como a função *cross-spectrum* é uma distribuição da densidade ao longo da frequência, sabe-se que $Y_k(\omega)$ e $Y_l(\omega)$ são as Transformadas de Fourier dos sinais temporais $y_k(t)$ e $y_l(t)$, respectivamente.

$$S_{kl}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E\{Y_k^*(\omega)Y_l(\omega)\} \quad (2.36)$$

Considere que $x_k(t)$ e $x_l(t)$ sejam sinais temporais de (2.12) que podem ser igualadas a $y_k(t)$ e a $y_l(t)$, respectivamente. Estes últimos sinais, após passarem pela transformação de Fourier, são substituídos em (2.36) e obtém-se:

$$S_{kl}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \left(\sum_{i=1}^n \Phi_{i,k} Z_i(\omega) \right)^* \left(\sum_{i=1}^n \Phi_{i,l} Z_i(\omega) \right) \right\} \quad (2.37)$$

De (2.11), após a transformação de Fourier, tem-se:

$$j\omega Z_i(\omega) = \lambda_i Z_i(\omega) + \underline{\Psi}_i \mathbf{B} \underline{U}(\omega) \quad (2.38)$$

$$Z_i(\omega) = \frac{\underline{\Psi}_i \mathbf{B} \underline{U}(\omega)}{j\omega - \lambda_i} \quad (2.39)$$

Substituindo (2.39) em (2.37):

$$S_{kl}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \left(\sum_{i=1}^n \Phi_{i,k} \frac{\underline{\Psi}_i \mathbf{B} \underline{U}(\omega)}{j\omega - \lambda_i} \right)^* \left(\sum_{i=1}^n \Phi_{i,l} \frac{\underline{\Psi}_i \mathbf{B} \underline{U}(\omega)}{j\omega - \lambda_i} \right) \right\} \quad (2.40)$$

Agora, assumamos que λ_i é um modo pouco amortecido, da forma:

$$\lambda_i = \alpha_i + j\omega_i \quad (2.41)$$

onde, $\alpha_i \ll \omega_i$. Fazendo $\omega = \omega_i$ [9], (2.39) pode ser reescrita:

$$Z_i(\omega_i) = \frac{\underline{\Psi}_i \mathbf{B} \underline{U}(\omega_i)}{-\alpha_i} \quad (2.42)$$

Para α_i muito pequeno, a amplitude de $Z_i(\omega_i)$ torna-se muito grande em relação à soma dos termos absolutos de (2.40). Sendo assim, para a frequência ω_i , (2.40) pode ser aproximada por:

$$S_{kl}(\omega_i) \cong \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \{ (\Phi_{i,k} Z_i(\omega_i))^* (\Phi_{i,l} Z_i(\omega_i)) \} \quad (2.43)$$

$$S_{kl}(\omega_i) \cong \Phi_{i,k}^* \Phi_{i,l} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \{ |Z_i(\omega_i)|^2 \} \right] \quad (2.44)$$

Assumindo uma natureza aleatória do sinal de entrada \underline{u} , o limite de (2.44) converge para uma constante real. Sendo assim, o valor do ângulo da função CSD

pode ser estimado por (2.45) [9]:

$$\angle S_{kl}(\omega_i) \cong \angle \Phi_{i,l} - \angle \Phi_{i,k} \quad (2.45)$$

Considerando o caso em que $k = l$, (2.44) pode ser reescrita e definida como sendo a função PSD, dada por (2.46):

$$S_{kl}(\omega_i) \cong |\Phi_{i,k}|^2 \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E\{|Z_i(\omega_i)|^2\} \right] \quad (2.46)$$

Desta maneira, pode-se dizer que as equações (2.45) e (2.46) são usadas para estimação das formas modais [9], na frequência de interesse ω_i . Em um sistema elétrico de potência, as PSD's são calculadas para cada gerador, e as CSD's, entre todos os geradores, e um gerador de referência.

Como o módulo da PSD indica o módulo do vetor da forma modal, o valor da PSD indica a participação, assim como a observabilidade, de cada gerador em um dado modo de oscilação. Desta maneira, a normalização das formas modais é realizada em relação ao gerador que possui maior observabilidade no modo em análise. Sendo assim, este gerador é escolhido como referência no cálculo das formas modais.

Capítulo 3

Resultados

Como ferramentas de simulação foram utilizados os programas PacDyn [18], Anatem [19], ambos desenvolvidos pelo CEPEL, e Matlab [20].

No PacDyn são obtidas as informações precisas do sistema, já que este programa faz uso da linearização do sistema de equações que modela o sistema de potência. Dentre as informações obtidas, estão funções de transferências, matrizes de estados, autovalores, formas modais, fatores de participação, amortecimentos e frequências, para um dado ponto de operação. Também são realizadas simulações com pequenas perturbações, como degrau na tensão de referência ou na potência mecânica dos geradores.

O programa Anatem é usado para simulações com grandes distúrbios como curtos-circuitos ou perda de uma linha de transmissão, por exemplo.

O Matlab é o programa no qual o Método de Prony é implementado, utilizando-se principalmente as funções *prony* e *residue*, e simulado a partir dos dados de saída do Anatem, ou até mesmo do PacDyn; este último, no caso de pequenos sinais. No Matlab pode haver também a manipulação do sinal com acréscimo de ruído, bem como a implementação de um filtro passa-baixa para melhorar a estimativa do método.

A análise do Método de Prony abrange estudos de aplicações para grandes e pequenas perturbações, técnicas de janelamento, presença de ruído e formas modais. O estudo dos métodos PSD e CSD engloba aplicações em pequenas e grandes

perturbações, e estimações das formas modais. Para simulações no Matlab foram escolhidas as funções *welch* e *cpsd*, para as funções PSD e CSD, nesta ordem.

Os sistemas simulados no estudo do Método de Prony foram os Sintético, Duas Áreas, *Brazillian Birds* e *New England* e os simulados nos Métodos PSD e CSD são os sistemas Duas Áreas e *New England*.

3.1 Resultados do Método de Prony

3.1.1 Sistema Sintético

Esta subseção reproduz a técnica utilizada em [21] para reconstruir um sinal de entrada a partir dos coeficientes estimados pelo Método de Prony e calcular as formas modais de um sistema didático ou Sintético. Os sinais de entrada do Método de Prony são os sinais de saída dos medidores. Considerou-se que o Sistema Sintético possui dois modos de oscilação. Além disso, é também apresentada a estimação das formas modais a partir do cálculo dos resíduos.

A Figura 3.1 representa o comportamento da resposta livre [21] de um Sistema Sintético, onde x_1 , x_2 , x_3 e x_4 são variáveis de estado do sistema. A função utilizada para criar este sistema foi a *initial*, da *Control System Toolbox*, do Matlab.

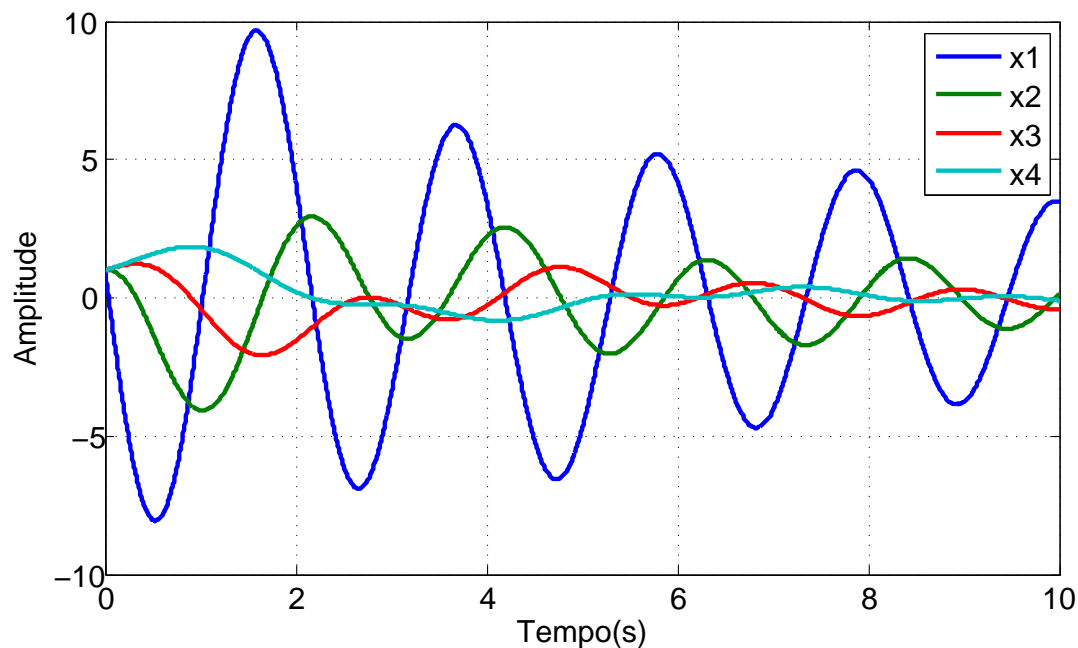


Figura 3.1: Resposta livre do Sistema Sintético.

3.1.1.1 Reconstituição de um Sinal Didático pelo Método de Prony

A matriz \mathbf{A} desse sistema é dada por (3.1). Os autovalores e autovetores à direita desta matriz são dados por (3.2) e (3.3), respectivamente.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0,8000 & -10,2200 & -5,6240 & -9,8209 \\ 1,0000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,0000 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} 0,9429 & 0,9429 & 0,5321 & 0,5321 \\ -0,0105 - 0,3140i & -0,0105 + 0,3140i & -0,1465 - 0,4882i & -0,1465 + 0,4882i \\ -0,1044 + 0,0070i & -0,1044 - 0,0070i & -0,4076 + 0,2687i & -0,4076 - 0,2687i \\ 0,0035 + 0,0347i & 0,0035 - 0,0347i & 0,3587 + 0,3000i & 0,3587 - 0,3000i \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} -0,1000 + 3,0000i \\ -0,1000 - 3,0000i \\ -0,3000 + 1,0000i \\ -0,3000 - 1,0000i \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

As curvas das variáveis de estados são usadas como entrada do Método de Prony para identificação dos modos eletromecânicos de oscilação.

Após aplicar o Método de Prony sobre cada curva do sistema, pode-se estimar a matriz \mathbf{A}_p , os autovalores e os autovetores à direita, a partir dos coeficientes do numerador e denominador fornecidos pelo método, conforme as equações (3.4), (3.5) e (3.6), respectivamente.

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} -0,8000 & -10,2200 & -5,6240 & -9,8209 \\ 1,0000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,0000 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{v}_p = \begin{bmatrix} 0,9429 & 0,9429 & 0,5321 & 0,5321 \\ -0,0105 - 0,3140i & -0,0105 + 0,3140i & -0,1465 - 0,4882i & -0,1465 + 0,4882i \\ -0,1044 + 0,0070i & -0,1044 - 0,0070i & -0,4076 + 0,2687i & -0,4076 - 0,2687i \\ 0,0035 + 0,0347i & 0,0035 - 0,0347i & 0,3587 + 0,3000i & 0,3587 - 0,3000i \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\lambda_p = \begin{bmatrix} -0,1000 + 3,0000i \\ -0,1000 - 3,0000i \\ -0,3000 + 1,0000i \\ -0,3000 - 1,0000i \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Comparando-se 3.1 e 3.4, pode-se notar que para este Sistema Sintético, os parâmetros estimados de Prony são idênticos aos parâmetros originais.

Sendo assim, a partir do Método de Prony, é também possível reconstruir a resposta livre do Sistema Sintético, conforme Figura 3.2. Note que os resultado de Prony para o Sistema Sintético é exato.

3.1.1.2 Estimação das Formas Modais a partir da Matriz de Estados

É conhecido que os autovetores à direita de uma dada matriz \mathbf{A} são as próprias formas modais e, portanto, como é possível a partir do Método de Prony estimar a matriz \mathbf{A}_p do sistema, é possível também estimar as formas modais via Prony.

A Figura 3.3 mostra as formas modais do Sistema Sintético original (a) e esti-

mada (b) via Prony, a partir da matriz de estados [21], para autovalor $-0,1 + 3,0i$ ou Modo #1 do sistema. Os vetores estão normalizados em relação ao vetor de maior módulo da forma modal.

3.1.1.3 Estimação das Formas Modais a partir dos Resíduos

A Figura 3.4 mostra a forma modal do autovalor $-0,1 + 3,0i$ do Sistema Sintético via Método Prony a partir do cálculo dos resíduos R1, R2, R3, R4. A Tabela 3.1 relaciona todos as variáveis das formas modais com cada modo do sistema. Os vetores estão normalizados em relação ao vetor de maior módulo da forma modal. A coluna destacada em rosa indica os valores utilizados para gerar a Figura 3.4.

Tabela 3.1: Valores das formas modais estimadas pelo Método de Prony a partir do cálculo dos Resíduos

Autovalor	$(-0,1 \pm 3,0i)$	$(-0,3 \pm 1,0i)$
R1 (x_1)	1,0000	1,0000
R2 (x_2)	$-0,0111 \pm 0,3330i$	$-0,2752 \pm 0,9174i$
R3 (x_3)	$-0,1107 \mp 0,0074i$	$-0,7659 \mp 0,5050i$
R4 (x_4)	$0,0037 \mp 0,0368i$	$0,6741 \mp 0,5637i$

O cálculo dos resíduos a partir dos coeficientes de Prony é capaz de fornecer diretamente a forma modal de um dado modo do sistema. Cada resíduo é associado a um polo do sistema. Como a forma modal indica uma atividade relativa das variáveis do sistema para um dado modo, ela deve ser construída com dados de múltiplos sinais destas variáveis.

Neste exemplo do Sistema Sintético, foram usadas as curvas das variáveis x_1 , x_2 , x_3 e x_4 . Considere ainda o modo $-0,1 + 3,0i$ como exemplo. Da curva x_1 , foi extraído o resíduo R1, associado à este modo. Da curva x_2 , foi extraído resíduo R2, associado ao mesmo modo, e o mesmo procedimento foi repetido para as demais curvas. Assim, tem-se a informação completa das formas modais.

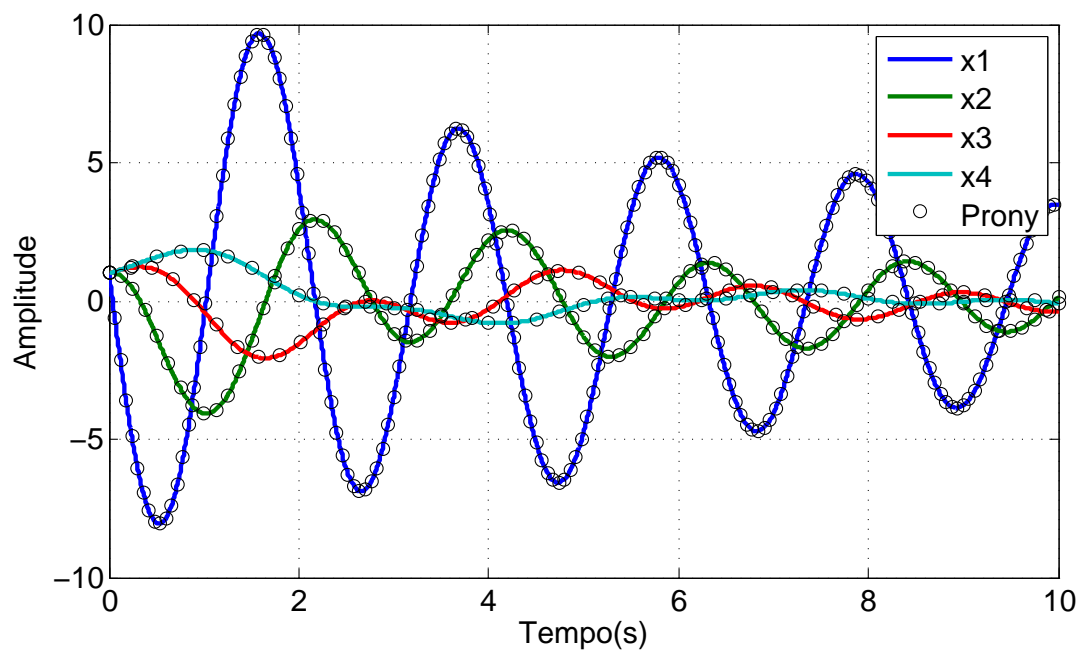
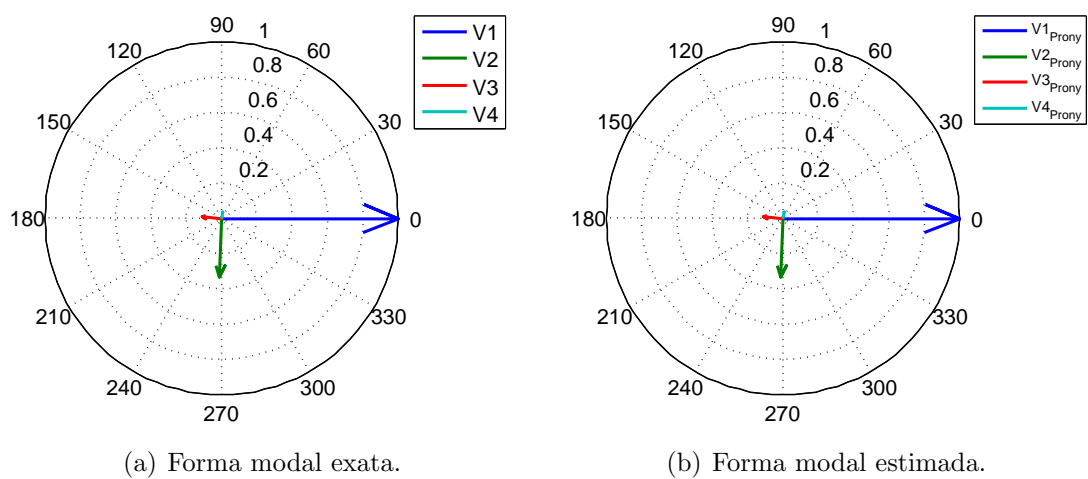


Figura 3.2: Resposta livre do Sistema Sintético e Aproximação de Prony.



(a) Forma modal exata.

(b) Forma modal estimada.

Figura 3.3: Formas Modais de velocidade do Sistema Sintético.

3.1.2 Sistema Duas Áreas

O sistema da Figura 3.5 [11] possui onze barras, quatro geradores e, portanto, três modos eletromecânicos de interesse, sendo dois modos locais e um modo interáreas. Com base no cálculo feito no PacDyn, os modos locais têm as frequências de 1,1383Hz e 1,2743Hz, e o modo interáreas 0,6825Hz. Os dados da Tabela 3.2 apresentam os autovalores deste sistema e seus respectivos valores de amortecimento, frequência e variáveis com maiores participações fornecidos pelo programa. As formas modais destes autovalores estão ilustradas na Figura 3.6, e seus valores de módulo e ângulo estão na Tabela 3.3.

Tabela 3.2: Modos eletromecânicos do Sistema Duas Áreas fornecidos pelo programa PacDyn.

Modo	Autovalor	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]	Participação
Modo 1	$0,06770 \pm 4,2880i$	-1,5783	0,6825	ω - Gerador #G3
Modo 2	$-0,6170 \pm 7,1522i$	8,5948	1,1383	δ - Gerador #G2
Modo 3	$-0,6165 \pm 8,0068i$	7,6773	1,2743	δ - Gerador #G4

A partir da Tabela 3.3, pode-se concluir quais os vetores têm real importância nos modos de oscilação. O Modo 1 é caracterizado pela oscilação coerente entre os geradores #3 e #4. Repare que o módulo das mesmas são bem maiores do que os dos geradores #1 e #2. De maneira análoga, pode-se dizer que o Modo 2 é caracterizados pela oscilação entre os geradores #1 e #2, assim como o Modo 3 é caracterizado pela oscilação entre os geradores #3 e #4.

Tabela 3.3: Informações dos módulos e ângulos das formas modais do Sistema Duas Áreas fornecidas pelo do PacDyn.

Gerador	Modo 1		Modo 2		Modo 3	
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
#G1	0,1215	-5,9679	0,6199	-169,9400	0,0363	108,6700
#G2	0,1333	88,7560	1,0000	0,0000	0,0888	-52,7330
#G3	1,0000	0,0000	0,0758	-163,1800	0,2261	188,9700
#G4	0,8801	5,1980	0,0832	20,4070	1,0000	0,0000

A partir destas informações, observando-se os vetores de oscilações entre os gera-

dores com participações mais significativas, foram definidas perturbações específicas para excitar o modo de interesse, conforme apresentado a seguir. O programa utilizado na aquisição de dados foi o PacDyn.

3.1.2.1 Pequenas Perturbações

Foram inicialmente simulados três casos com pequenas perturbações:

Caso 1 - Foi aplicado um degrau positivo na tensão de referência de um gerador; foi observada, na saída, a velocidade angular do mesmo gerador. Este teste foi realizado nos geradores #G1, #G2, #G3 e #G4 e seus resultados estão mostrados na Tabela 3.4.

Caso 2 - Foi aplicado um degrau positivo na tensão de referência do gerador #G1; foram observados os sinais de velocidades angulares nas saídas de todos os geradores. Não foi possível identificar nenhum modo de oscilação eletromecânico.

Caso 3 - Foram aplicados degraus positivos nas tensões de referência dos geradores #G3 e #G4; foram medidos os sinais de velocidade entre os geradores #G3 e #G4, para detectar o modo local da Área 2. O mesmo teste foi aplicado nos geradores #G1 e #G3, para detectar o modo interáreas, referente às oscilações entre a Área 1 e a Área 2. O resultado está mostrado na Tabela 3.5.

Tabela 3.4: Resultado do Método de Prony para o Caso 1.

Gerador	Autovalores	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]
#G1	$-6,67e-001 \pm 6,97e+000i$	10	1,11
#G2	$-9,07e-002 \pm 4,09e+000i$	2	0,65
#G3	$6,46e-002 \pm 4,32e+000i$	-1	0,69
#G4	$-8,42e-001 \pm 4,54e+000i$	18	0,74

Tabela 3.5: Resultado do Método de Prony para o Caso 3.

Gerador	Autovalores	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]
#G1 - #G3	$-8,95e-002 + 4,31e+000i$	2	0,69
#G3 - #G4	$6,83e-002 + 4,32e+000i$	-2	0,69

Todos os sinais de velocidade obtidos neste trabalho, a partir dos programas PacDyn e Anatem, são exatamente os desvios de velocidade angular dos geradores, em relação aos valores de velocidade angular na frequência de 60Hz.

Pode-se observar que no Caso 1, o Método de Prony não detecta todos os modos de oscilações. A Tabela 3.2 mostra os valores precisos para os modos eletromecânicos, bem como suas respectivas participações e frequências. A Tabela 3.4 mostra os resultados de Prony para o Caso 1. Comparando-se os valores das Tabelas 3.2 e 3.4, pode-se notar que os modos identificados são referentes aos Modos 1 e 2. O Modo 3 não foi identificado. Na Tabela 3.4, os modos identificados pelos sinais de velocidade angular dos geradores #G2 e #G4 estão com valores para frequências mal aproximados, 0,65 e 0,74 Hz, respectivamente. No caso do gerador #G2, houve uma diferença de 0,03 Hz a menos no valor da frequência estimada. E no caso do gerador #G4, houve uma diferença de 0,07 Hz a mais no valor da frequência estimada, além de um erro de mais de 10 vezes na estimativa do valor do amortecimento. Isso pode ser justificado pelo fato do Método de Prony fornecer melhores resultados para casos em que ocorrem distúrbios *RingDown*. As perturbações dadas nos geradores #G2 e #G4 podem não ter sido suficientes para excitar um modo de oscilação do sistema.

A simulação do Caso 2, em que é aplicado um degrau na tensão de referência de um dado gerador e observados os sinais de velocidade nos demais geradores, não levou à identificação de nenhum dos modos eletromecânicos do sistema. Isso se deve ao fato de que o Método de Prony identifica modos de oscilação em casos de alta observabilidade do sistema. A perturbação em um dado gerador, possivelmente não excitará um modo de oscilação, quando se observa um outro gerador.

O Caso 3 também levou somente à identificação do modo local, na frequência de 0,69Hz. Isso mostra a ineficiência do método para casos com pequenos distúrbios.

3.1.2.2 Grandes Perturbações

A seguir, serão apresentadas novas simulações, agora de casos com grandes perturbações. Esta segunda etapa de testes foi direcionada de forma a se obter os modos de oscilação não identificados na primeira etapa de simulações. Para isto, em todos os próximos três casos, foi aplicado um curto-circuito com duração de 300ms na Barra#8 do sistema da Figura 3.5.

Caso 4 - A partir de um curto-circuito com duração de 300ms na Barra#8 foram medidos os sinais de velocidades nas máquinas #G1 e #G3, e aplicado o Método de Prony sobre o sinal resultante da diferença entre as duas medidas, $\Delta\omega_1 - \Delta\omega_3$, com a intenção de detectar o modo interárea, já que o gerador #G1 pertence à Área 1 e o gerador #G3 pertence à Área 2.

Caso 5 - Foi realizado o mesmo procedimento do Caso 4, porém, os sinais de velocidades medidos foram os das máquinas #G3 e #G4, e aplicado o Método de Prony sobre o sinal resultante da diferença entre as duas medidas, $\Delta\omega_3 - \Delta\omega_4$. O objetivo deste caso é detectar o modo local da Área 2, onde estão localizados os geradores #G3 e #G4.

Caso 6 - Da mesma maneira do caso anterior, foram medidos os sinais de velocidades das máquinas #G1 e #G2, e aplicado o Método de Prony sobre o sinal resultante da diferença entre as duas medidas, $\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2$. Também, o objetivo deste caso é detectar o modo local, agora, da Área 1, onde estão localizados geradores #G1 e #G2.

Tabela 3.6: Resultado do Método de Prony para os Casos 4, 5 e 6.

Caso	Gerador	Autovalores	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]
Caso 4	#G1 - #G3	$4,91e-002 \pm 4,31e+000i$	-1	0,69
Caso 5	#G3 - #G4	$-6,35e-001 \pm 5,50e+000i$	12	0,88
Caso 6	#G1 - #G2	$-3,62e-001 \pm 7,14e+000i$	5	1,14

A Tabela 3.6 apresenta os resultados dos três últimos casos simulados.

Nota-se que no Caso 4 foi possível identificar o modo interárea, entre as Áreas 1 e 2, cuja frequência calculada pelo PacDyn é de 0,68Hz e o amortecimento é de

-2%. O método estimou este modo com uma boa aproximação, nos valores para frequência e amortecimento, de 0,69Hz e -1%, respectivamente.

A identificação dos modos locais só foi bem sucedida no Caso 6, embora este caso tenha apresentado um pequeno erro no amortecimento, de 4%. No Caso 5, ao tentar identificar o modo de oscilação local da Área 2, o método foi ineficiente, apresentando valores distantes do esperado.

Para contornar o problema de identificação do modo de oscilação local da Área 2, foi criado o Caso 7, a seguir.

Caso 7 - A partir de um curto-circuito com duração de 300ms na Barra#11, localizada na Área 2, foram medidos os sinais de velocidades nas máquinas #G3 e #G4, e aplicado o Método de Prony sobre o sinal resultante da diferença entre as duas medidas, $\Delta\omega_3 - \Delta\omega_4$.

Tabela 3.7: Resultado do Método de Prony para o Caso 7.

Gerador	Autovalores	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]
#G3 - #G4	$-9,18e-001 \pm 9,56e+000i$	10	1,53

Pode-se notar que ao se aplicar a falta numa barra mais próxima da Área 2, foi possível detectar de maneira mais precisa o modo de oscilação local da Área 2. O valor detectado apresenta um erro no amortecimento de 2%, e um erro de 0,26Hz de frequência.

3.1.2.3 Efeitos das Janelas de Simulações Reduzidas sobre o Método de Prony

Neste sistema, ainda pode-se introduzir estudos sobre o efeito das janelas de simulação reduzidas no Método de Prony. Sendo assim, se os dados de entrada da curva para análise são referentes a uma simulação com 10s de duração, pode-se aplicar o método sobre, por exemplo, uma janela de 3s.

A Tabela 3.8 mostra os diferentes resultados para simulação do Caso 7, ao se reduzir as janelas de simulação, onde $t_{inicial}$ é o tempo inicial do distúrbio e t_{final} é

o tempo final do distúrbio.

Tabela 3.8: Simulação do Caso 7 com a Janela de Simulação reduzida.

$t_{inicial}$ [s]	t_{final} [s]	Autolavor	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]
1,000	4,275	-9,17e-001 + 9,56e+000i	9,55	1,53
1,000	4,000	-9,16e-001 + 9,42e+000i	9,67	1,51
1,000	3,000	-8,38e-001 + 8,99e+000i	9,29	1,44
1,000	2,500	-1,00e+000 + 9,06e+000i	11,00	1,45
1,200	4,275	-9,51e-001 + 9,71e+000i	9,75	1,55
1,200	3,000	-9,03e-001 + 9,16e+000i	9,81	1,47
1,330	3,000	-1,45e+000 + 9,04e+000i	16,00	1,46
1,330	2,500	-1,63e+000 + 8,47e+000i	18,90	1,37

Vale ressaltar que em todos os casos anteriores os curtos-circuitos foram aplicados no instante 1s e, por isso, as janelas de simulação sempre se iniciam em valores iguais ou superiores a 1s.

Tomando-se como base o valor de frequência do modo local da Área 2, 1,27Hz (ver Tabela 3.2), serão observados os valores de frequência obtidos pelo método.

Inicialmente foi alterado o tempo final da janela de simulação. Note que para tempos finais inferiores ou superiores a 3s, os valores apresentados pelo método se distanciam do valor esperado, 1,27Hz. Depois, foi observado o tempo inicial da simulação, e pôde-se concluir que o valor do tempo inicial, para que o método mais se aproxime do valor esperado, foi de 1,330s.

Em contrapartida, o valor do amortecimento estimado vai perdendo a precisão à medida que a janela de simulação vai sendo alterada. Quanto menor a janela de simulação, pior é a estimativa do amortecimento do modo eletromecânico.

3.1.2.4 Efeitos dos Ruídos sobre o Método de Prony

Foi realizado um estudo acerca da precisão do Método de Prony para situações em que os sinais a serem analisados apresentem ruído. Para isto, foi aproveitado o Caso 6 do Sistema Duas Áreas.

A partir da função SNR, ou também *Signal Noise Ratio*, do Matlab foram introduzidos diferentes intensidades de ruídos nos sinais de velocidade medidos. Vale

ressaltar que, o valor dado por SNR indica a razão entre o sinal e o ruído e, portanto, quanto menor for o valor de SNR, maior será a quantidade de ruído presente no sinal a ser estudado.

A Tabela 3.9 mostra os resultados do experimento realizado, para diferentes valores de SNR.

Tabela 3.9: Modos eletromecânicos identificados de sinais com ruído.

SNR	Autolavor	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]
Sem Ruído	$-3,78e-001 \pm 7,13e+000i$	5	1,14
150	$-3,78e-001 \pm 7,13e+000i$	5	1,14
100	$-3,75e-001 \pm 7,13e+000i$	5	1,14
80	$-3,78e-001 \pm 7,13e+000i$	5	1,14
60	$-4,57e-001 \pm 7,14e+000i$	6	1,14
55	$-7,18e-001 \pm 7,14e+000i$	10	1,14
50	$-1,57e+000 \pm 7,08e+000i$	22	1,15
40	$-3,84e+001 \pm 1,94e+002i$	19	31,51
30	$-6,06e+001 \pm 1,60e+002i$	35	27,22
20	$-5,41e+001 \pm 1,45e+002i$	35	24,51

Pode-se notar na Tabela 3.9 que quanto menor for a SNR, menos precisas serão as estimativas de amortecimento e de frequência. Para a SNR igual a 40, o valor do amortecimento estimado foi um pouco superior ao dobro do valor esperado e o valor da frequência estimada foi de aproximadamente 28 vezes o valor esperado.

O Método de Prony é sensível a ruídos e normalmente é necessário que se faça um procedimento de filtragem dos dados antes da aplicação do método. Caso a filtragem não seja feita, pode ocorrer o surgimento de modos necessários para acomodar os ruídos, componentes contínuas e tendências que podem comprometer significativamente o processo de identificação [6].

3.1.3 Sistema *Brazilian Birds*

O Sistema *Brazilian Birds* [23] é composto por 48 barras e 4 geradores, conforme mostrado na Figura 3.7.

3.1.3.1 Avaliação da Precisão do Método de Prony

Com o objetivo de avaliar a precisão do Método de Prony, foram reproduzidos os seguintes testes, de [24], no sistema *Brazilian Birds*, no programa Anatem:

Caso 1 - Foi aplicado um curto-circuito com duração de 75ms na barra #100 da subestação Canário, cuja tensão nominal é de 230kV, seguido da abertura da linha de transmissão entre as barras #100 e #150, sendo esta última, a barra da subestação Tiziu.

Caso 2 - Foi aplicado um curto-circuito com duração de 75ms na barra #131 da subestação Curió, cuja tensão nominal é de 440kV, seguido da abertura da linha de transmissão entre as barras #131 e #221, sendo esta última, a barra da subestação Arara.

Após cada simulação, foram medidos os sinais de tensão, frequência e ângulo das usinas Canário, Tucano, Gavião e Sabiá. A barra da usina Canário foi usada como referência angular.

A Tabela 3.10 apresenta as informações de modos eletromecânicos, amortecimento e frequência do sistema *Brazilian Birds*, obtidas a partir do programa PacDyn. Os Modos #1, #2 e #4 são modos eletromecânicos. O Modo #3 é um modo da excitatriz.

Tabela 3.10: Modos Eletromecânicos do Sistema *Brazilian Birds*.

Modo	Autovalores	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]	Estado	Máquina
#1	$-0,3106 \pm 6,3507$	4,89	1,0108	Ângulo	Canário
#2	$-0,5880 \pm 8,3618$	7,01	1,3308	Ângulo	Gavião
#3	$-0,2610 \pm 2,9713$	8,75	0,4729	Tensão	Gavião
#4	$-1,0799 \pm 8,3956$	12,76	1,3362	Frequência	Sabiá

A Tabela 3.11 mostra os resultados obtidos com a utilização de diferentes sinais. Nela, são apresentados os Modos #1, #2 e #4, bem como suas respectivas informações de amortecimento e frequência, identificados pelo Método de Prony.

Para comparação entre o Método de Prony e o método linear do PacDyn, foram calculadas as médias das diferenças entre os valores fornecidos entre estes dois

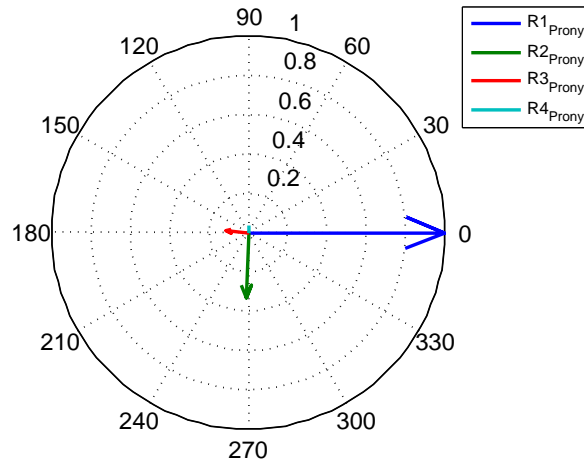


Figura 3.4: Forma modal de velocidade do Sistema Sintético estimada a partir do cálculo dos Resíduos.

Tabela 3.11: Resultado do Método de Prony para o Teste 1 - Curto-circuito em Canário.

Modo	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]	Estado (Sinal Utilizado)	Máquina
#1	5,71	1,0059	Frequência	Canário
#1	4,91	0,9836	Tensão	Canário
#1	5,15	0,9772	Ângulo	Gavião
#1	5,57	0,9979	Frequência	Gavião
#1	5,01	1,0313	Tensão	Gavião
#1	4,98	0,9740	Ângulo	Sabiá
#1	6,29	1,0059	Frequência	Sabiá
#1	5,27	0,9899	Ângulo	Tucano
#1	5,03	1,0122	Frequência	Tucano
#1	5,39	1,0393	Tensão	Tucano
#2	6,83	1,4276	Frequência	Gavião
#2	8,08	1,2796	Ângulo	Sabiá
#2	8,43	1,2414	Tensão	Sabiá
#4	12,60	1,2812	Frequência	Canário
#4	13,90	1,3751	Ângulo	Gavião
#4	12,50	1,3815	Ângulo	Sabiá
#4	13,60	1,2939	Frequência	Sabiá
#4	13,00	1,2685	Tensão	Sabiá
#4	12,60	1,2955	Ângulo	Tucano
#4	13,30	1,5295	Frequência	Tucano

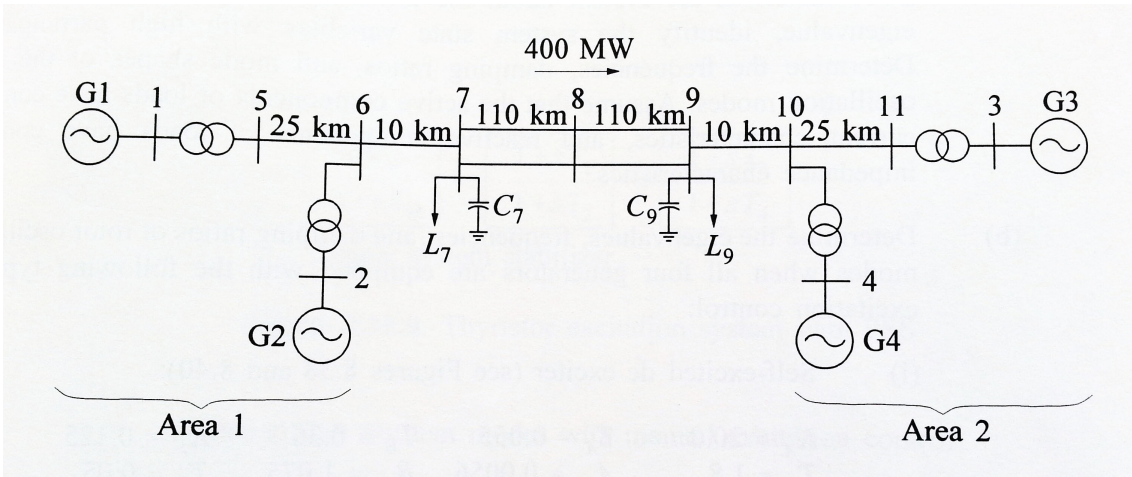
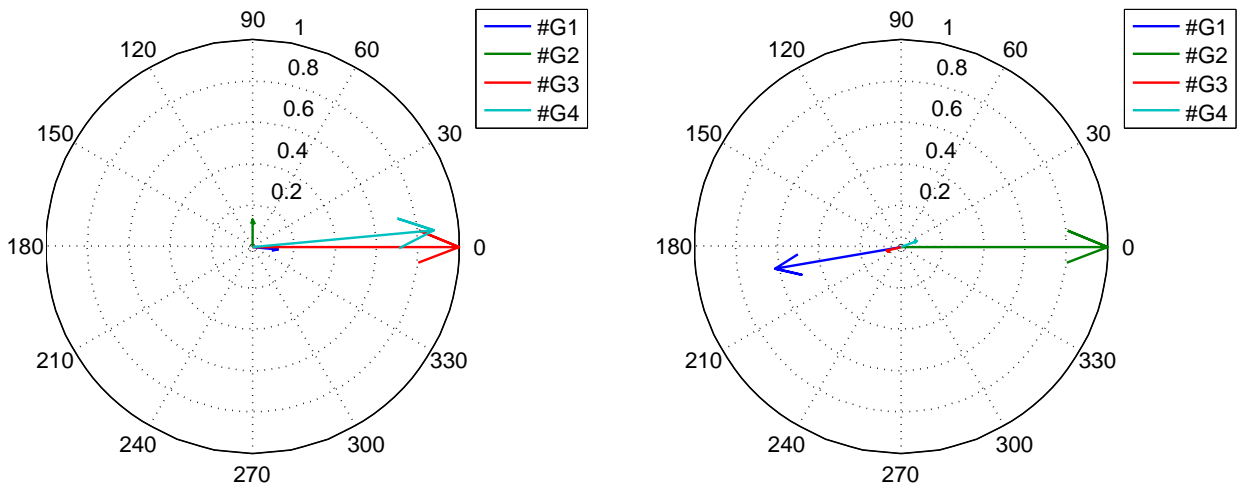
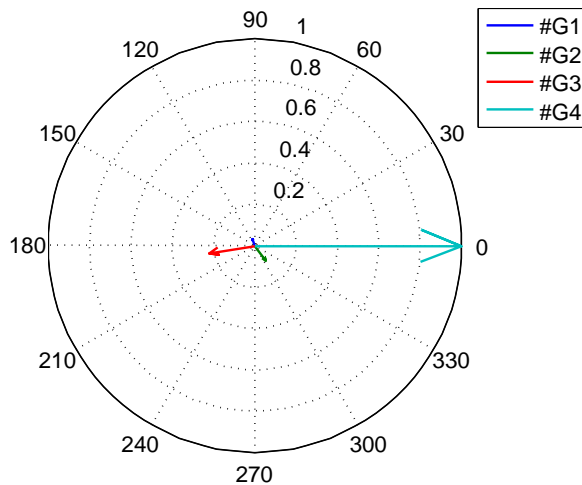


Figura 3.5: Diagrama unifilar do Sistema Duas Áreas.



(a) Modo 1 (interáreas) - 0,6825 Hz.

(b) Modo 2 (local) - 1,1383 Hz.



(c) Modo 3 (local) - 1,2743 Hz.

Figura 3.6: Formas modais de velocidade fornecidos pelo programa PacDyn.

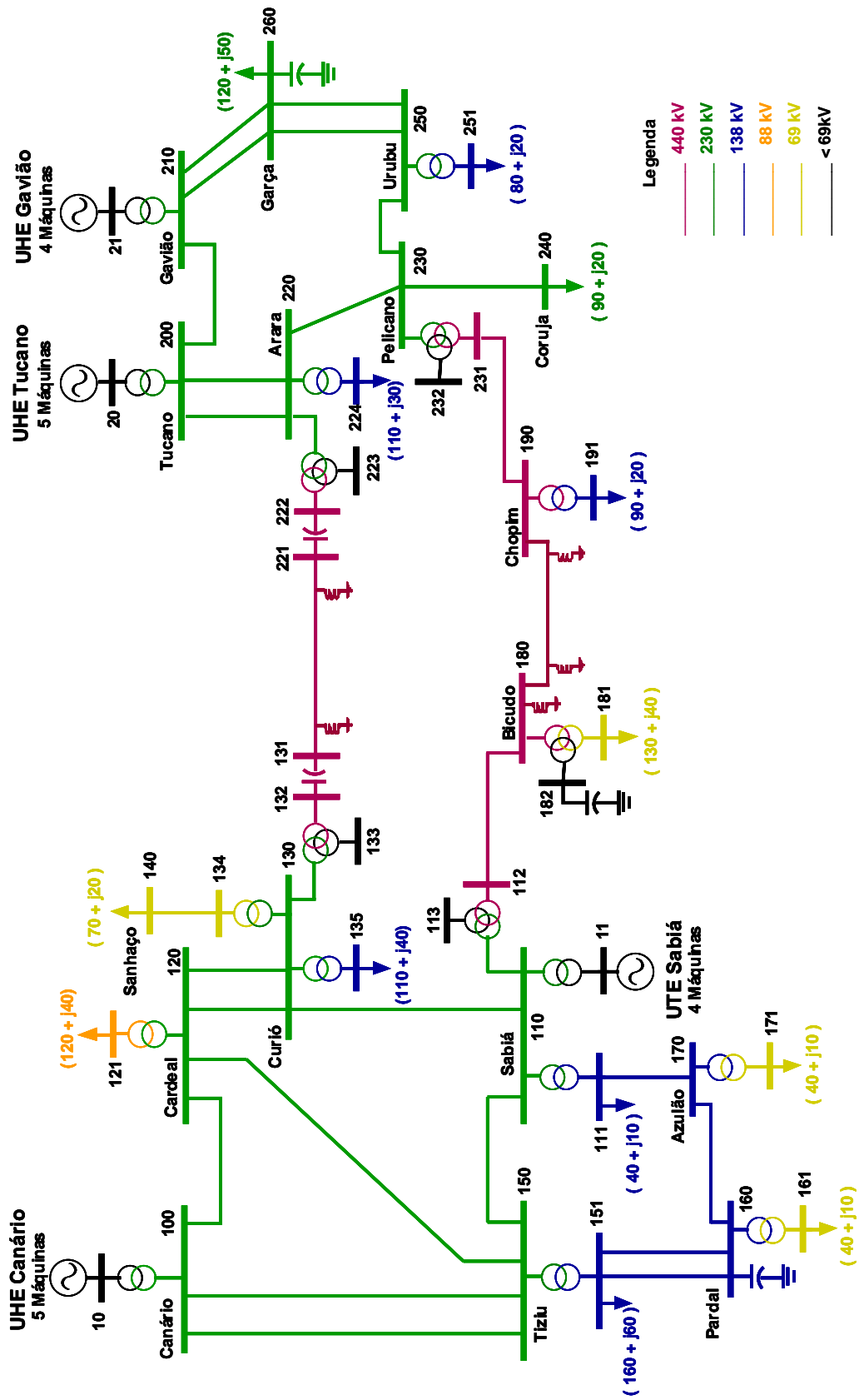


Figura 3.7: Sistema *Brazilian Birds* [24].

métodos, dada por (3.7), para cada modo.

$$M_{desvio} = \frac{\sum |V_{ref} - V_{Prony}|}{n} \quad (3.7)$$

onde M_{desvio} é a média dos desvios de frequência ou de amortecimento, V_{ref} é o valor de referência de frequência ou de amortecimento obtidos pelo PacDyn e V_{Prony} é o valor estimado pelo Método de Prony de frequência ou de amortecimento. Todos estes parâmetros devem ser considerados separadamente para cada modo de oscilação.

Os resultados obtidos estão na Tabela 3.12. Vale ressaltar que os valores obtidos nesta tabela, correspondem aos resultados de simulações com janelas reduzidas, conforme abordado no Sistema Duas Áreas.

Tabela 3.12: Média dos Desvios - Teste 1.

Modo	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]
#1	0,45	0,0192
#2	0,89	0,0791
#4	0,48	0,06090

De maneira análoga, a Tabela 3.13 mostra os resultados do Método de Prony para o Teste 2, no qual é aplicado um curto-circuito em Curió, e a Tabela 3.14 mostra a média dos desvios para cada modo identificado. Neste teste, também foram utilizadas janelas reduzidas de simulação.

Todos os resultados deste sistema foram obtidos por meio de janelamento dos dados analisados. Caso contrário, o Método de Prony não identifica bem os modos eletromecânicos. A dificuldade na identificação dos modos deste sistema também é devido ao fato do Sistema *Brazilian Birds* possuir dois modos eletromecânicos, #2 e #4, com frequências muito próximas, 1,3308 e 1,3362Hz, respectivamente. Os desvios nos valores de amortecimento e de frequência indicam uma boa precisão nas estimação modal.

Tabela 3.13: Resultado do Método de Prony para o Teste 2 - Curto-circuito em Curió.

Modo	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]	Estado (Sinal Utilizado)	Máquina
#1	5,67	0,7846	Frequência	Canário
#1	5,19	0,7958	Frequência	Gavião
#1	4,88	0,7767	Ângulo	Sabiá
#1	5,86	0,8117	Frequência	Sabiá
#1	5,37	1,0966	Frequência	Tucano
#2	7,01	1,3162	Ângulo	Gavião
#2	7,70	1,3655	Frequência	Gavião
#2	7,26	1,3592	Ângulo	Tucano
#2	7,02	1,3401	Frequência	Tucano
#4	12,70	1,4022	Frequência	Canário
#4	12,90	1,3560	Ângulo	Gavião
#4	12,70	1,2716	Frequência	Gavião
#4	13,70	1,3146	Ângulo	Sabiá
#4	12,90	1,3608	Frequência	Sabiá
#4	12,80	1,2844	Ângulo	Tucano
#4	12,80	1,3114	Frequência	Tucano

Tabela 3.14: Média dos Desvios - Teste 2.

Modo	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]
#1	0,51	0,1920
#2	0,24	0,0218
#4	0,20	0,0390

3.1.4 Sistema *New England*

O Sistema *New England* apresentado na Figura 3.8 é caracterizado por 10 geradores e 39 barras, das quais a barra 39 é uma barra infinita.

A Tabela 3.15 apresenta os autovalores do Sistema *New England* e seus respectivos valores de amortecimento e frequência, fornecidos pelo PacDyn.

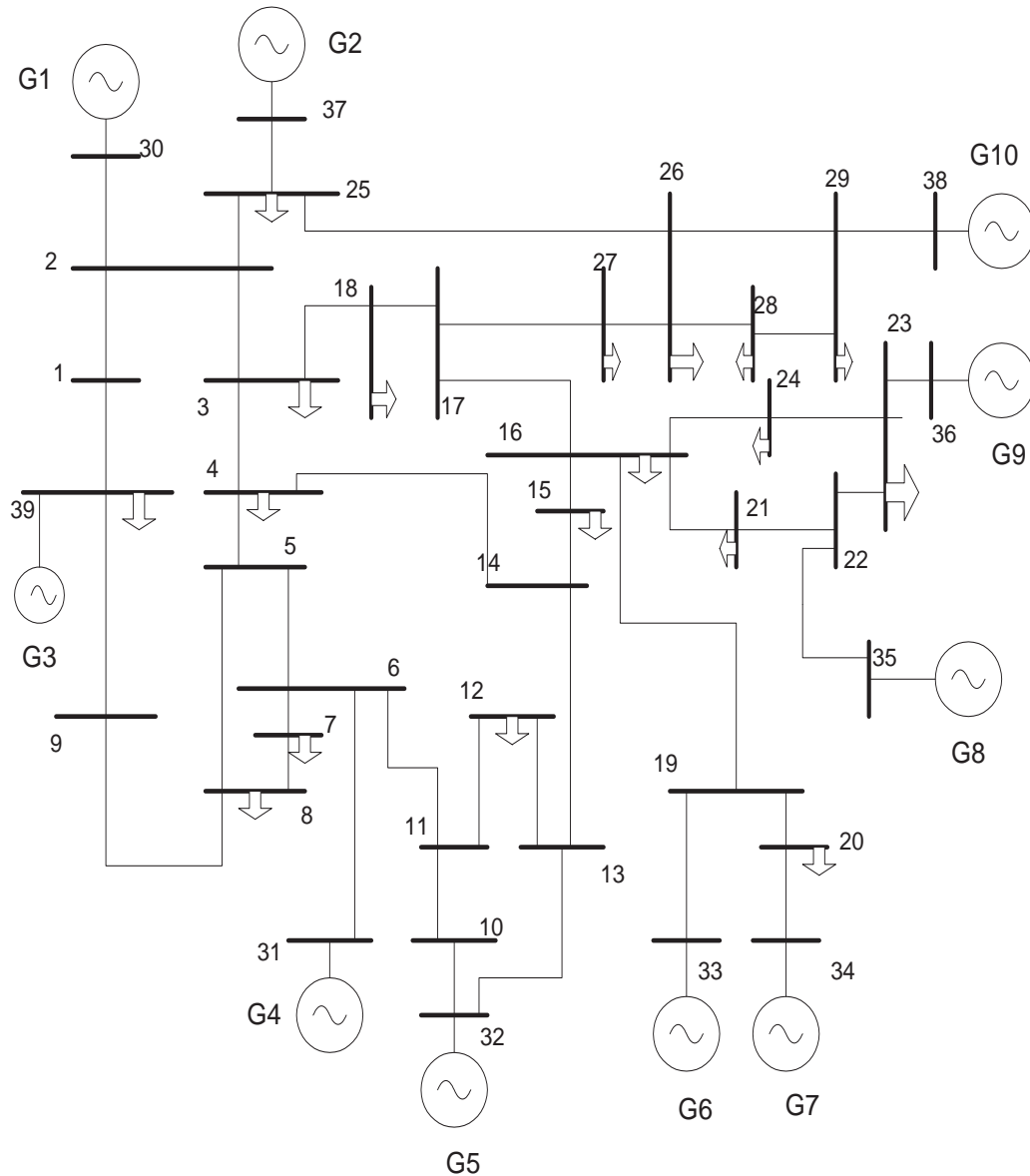


Figura 3.8: Diagrama unifilar do Sistema *New England*.

As Tabelas 3.16, 3.17 e 3.18 mostram os valores dos módulos e ângulos dos vetores das formas modais do Sistema *New England*, calculados pelo PacDyn. Os vetores cuja participação no modo é considerada relevante foram destacados em azul.

ou em vermelho. Os vetores em azul oscilam contra os vetores em vermelho.

Em sistemas pequenos, como o Duas Áreas, problemas na identificação dos modos são menos evidentes. No entanto, em aplicações com grandes perturbações, ao estudar um sistema maior como o *New England*, ou aumentar o distúrbio, percebeu-se que fica inviável dar uma perturbação num ponto e tentar observar o comportamento de todos os modos. Sendo assim, foram predefinidas as perturbações para identificar apenas um modo de interesse, e não todos os modos do sistema, como ocorreu com o sistema Duas Áreas.

Estas perturbações podem ser caracterizadas por degraus na tensão de referência ou na potência mecânica dos geradores. O programa utilizado para a aplicação das perturbações foi o PacDyn. Para o estudo da estimação das formas modais a partir dos resíduos, utilizou-se somente casos com degraus na tensão de referência dos geradores.

3.1.4.1 Degrau na Tensão de Referência dos Geradores

Foram formulados os seguintes casos de estudos:

Caso 1 - Foi aplicado um degrau positivo na tensão de referência do gerador #G3.

Caso 2 - Foram aplicados um degrau positivo na tensão de referência do gerador #G8 e outro negativo no gerador #G9.

Tabela 3.15: Modos eletromecânicos do Sistema *New England*.

Modo	Autovalor	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]	Participação
Modo 1	-0,2463 ± 3,6783	6,6807	0,5854	δ - Gerador #G3
Modo 2	-0,4764 ± 8,9571	5,3107	1,4256	δ - Gerador #G9
Modo 3	-0,3058 ± 5,7807	5,2820	0,9200	δ - Gerador #G10
Modo 4	-0,4218 ± 8,7694	4,8046	1,3957	δ - Gerador #G2
Modo 5	-0,2888 ± 6,2716	4,6005	0,9982	δ - Gerador #G4
Modo 6	-0,3793 ± 8,6029	4,4044	1,3692	δ - Gerador #G6
Modo 7	-0,3037 ± 6,9465	4,3673	1,1056	δ - Gerador #G8
Modo 8	-0,2883 ± 7,5287	3,8271	1,1982	δ - Gerador #G5
Modo 9	-0,1167 ± 7,0879	1,6457	1,1281	δ - Gerador #G1

Tabela 3.16: Valores das formas modais fornecidos pelo PacDyn dos Modos 1, 2 e 3.

Localização	Modo 1		Modo 2		Modo 3	
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G1	0,3316	3,6052	0,0124	230,7900	0,1836	195,0000
Gerador #G2	0,3742	0,2739	0,0704	76,1990	0,2040	185,5500
Gerador #G3	0,5627	172,2600	-	-	0,0174	3,7867
Gerador #G4	0,3672	0,3152	0,0053	60,5270	0,0119	157,6400
Gerador #G5	0,4203	-0,5370	0,0099	63,9590	0,0055	82,7550
Gerador #G6	0,6882	-0,5955	0,1092	68,3510	0,3097	4,1863
Gerador #G7	1,0000	0,0000	-	-	1,0000	0,0000
Gerador #G8	0,6712	0,2702	0,7695	183,9400	0,1436	5,6696
Gerador #G9	0,7088	1,1957	1,0000	0,0000	0,1445	8,0294
Gerador #G10	0,7655	-1,6745	0,0086	33,9190	0,9655	183,1700

Tabela 3.17: Valores das formas modais fornecidos pelo PacDyn dos Modos 4, 5 e 6.

Localização	Modo 4		Modo 5		Modo 6	
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G1	0,2486	170,6200	0,2479	3,5523	0,1147	163,0900
Gerador #G2	1,0000	0,0000	0,1020	-11,1870	0,2396	-8,3289
Gerador #G3	0,0055	-168,6200	0,0583	174,6900	-	-
Gerador #G4	0,0264	-168,8500	1,0000	0,0000	0,0286	174,4600
Gerador #G5	0,0335	-163,5900	0,8512	-3,5843	0,0493	176,5700
Gerador #G6	0,3028	175,0900	0,0830	199,4600	1,0000	0,0000
Gerador #G7	0,0655	-8,7660	0,8195	174,1200	0,2720	181,0100
Gerador #G8	0,0197	-144,9200	0,2249	-20,4310	0,1752	159,6800
Gerador #G9	0,0304	-54,5870	0,2139	-16,9080	0,2473	193,4800
Gerador #G10	0,0857	-168,3100	0,6592	176,6800	0,0328	179,7000

Caso 3 - Foram aplicados um degrau positivo na tensão de referência do gerador #G7 e outro negativo no gerador #G10.

Caso 4 - Foram aplicados um degrau positivo na tensão de referência do gerador #G2 e degraus negativos nas tensões de referência dos geradores #G6 e #G1.

Caso 5 - Foram aplicados degraus positivos nas tensões de referência dos geradores #G4 e #G5 e degraus negativos nas tensões de referência dos geradores #G7 e #G10.

Caso 6 - Foram aplicados degraus positivos nas tensões de referência dos geradores #G6 e #G2 e degraus negativos nas tensões de referência dos geradores #G7 e #G9.

Caso 7 - Foram aplicados degraus positivos nas tensões de referência dos geradores #G8 e #G9 e degraus negativos nas tensões de referência dos geradores #G4, #G7 e #G5.

Caso 8 - Foram aplicados um degrau positivo na tensão de referência do gerador #G5 e outro negativo no gerador #G4.

Caso 9 - Foram aplicados degraus positivos nas tensões de referência dos geradores #G1 e #G2 e degraus negativos nas tensões de referência dos geradores #G9, #G8, #G10 e #G4.

O objetivo da formulação dos Casos 1 a 9 foi identificar os Modos 1 a 9, respectivamente, como definidos na Tabela 3.15.

3.1.4.2 Estimação das Formas Modais pelo cálculo dos Resíduos

As Figuras 3.9 a 3.17 comparam as formas modais calculadas pelo PacDyn com as formas modais estimadas pelo Método de Prony. Estas figuras estão relacionadas com os Casos de 1 a 9, respectivamente, e foram estimadas a partir dos sinais de velocidades medidos em cada gerador do Sistema *New England*. O critério de cálculo foi idêntico ao do Sistema Sintético, descrito na subseção 3.1.1.3, calculando-se os resíduos. Os valores dos resíduos calculados são apresentados nas Tabelas 3.19 a 3.27 e estão relacionados com o modo identificado e seus respectivos valores de frequência

identificados. Todas as formas modais associadas aos nove modos eletromecânicos deste sistema foram qualitativamente bem estimadas. No cálculo destas formas modais foram identificados 38 valores de frequência. 82% dos desvios destes valores de frequência em relação aos valores esperados, foram inferiores à 0,009Hz, 18% dos desvios possuem valores entre 0,009 e 0,038Hz.

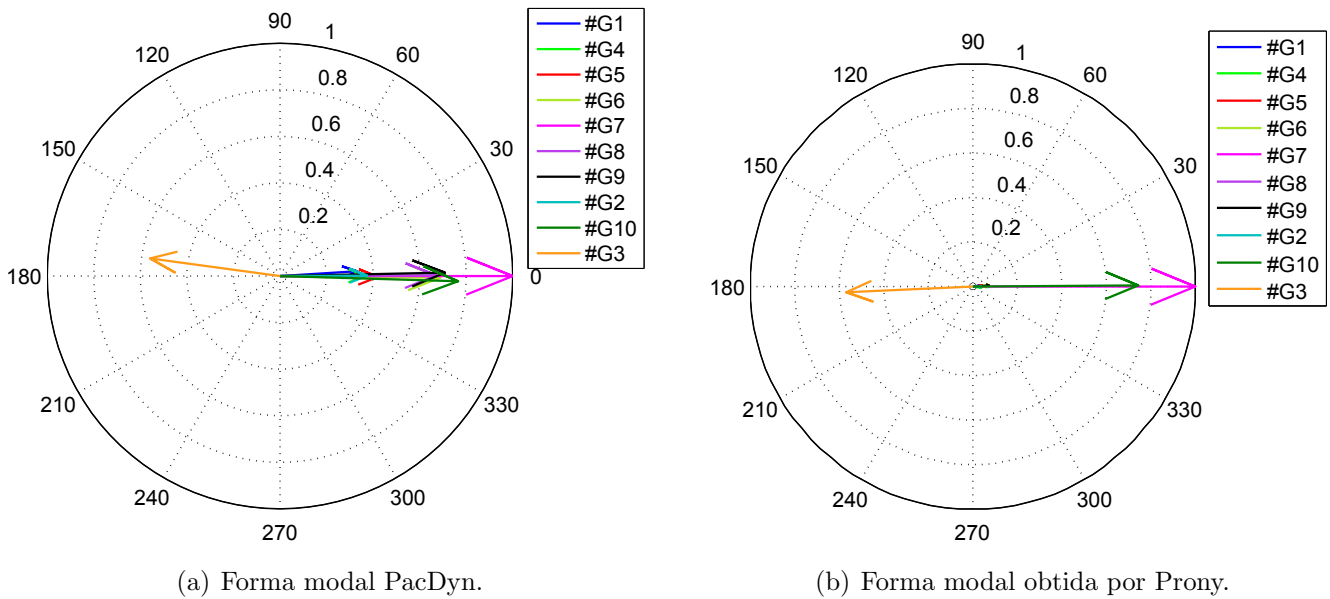


Figura 3.9: Caso 1 - Formas modais de velocidade do Modo 1 (0,5854 Hz).

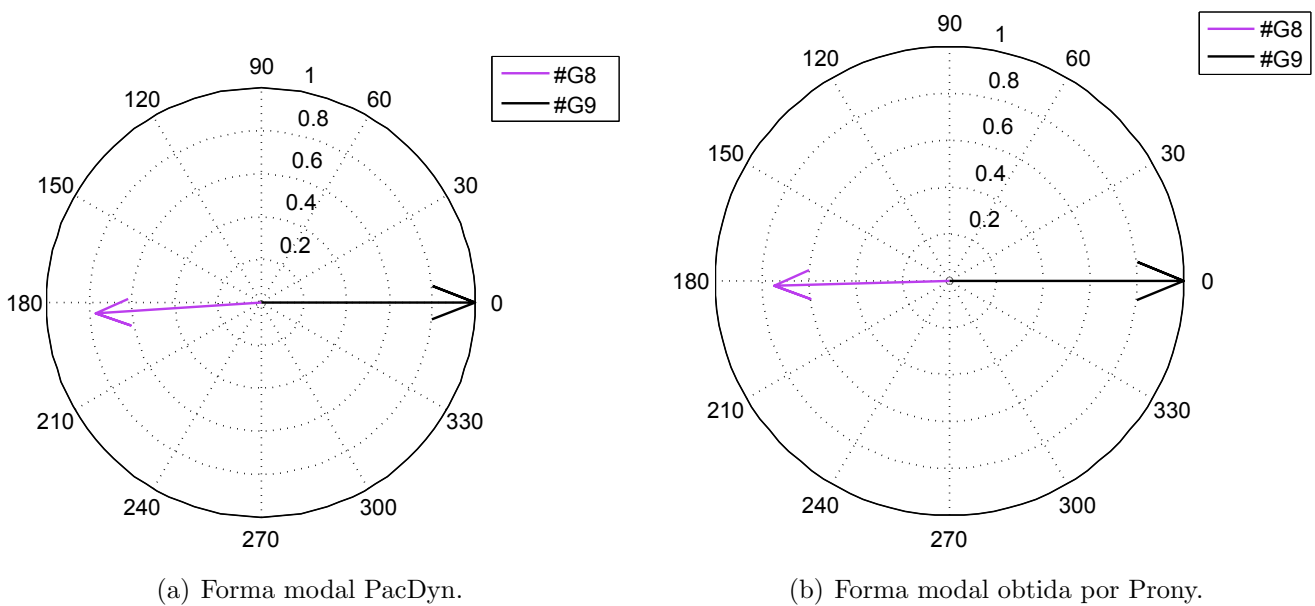


Figura 3.10: Caso 2 - Formas modais de velocidade do Modo 2 (1,4256Hz).

Tabela 3.18: Valores das formas modais fornecidos pelo PacDyn dos Modos 7, 8 e 9.

Localização	Modo 7		Modo 8		Modo 9	
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G1	0,4402	69,3480	0,0456	169,9200	1,0000	0,0000
Gerador #G2	0,1943	47,7210	0,0118	117,8300	0,3792	-16,5620
Gerador #G3	0,0094	283,2700	-	-	0,0211	174,6100
Gerador #G4	0,7649	192,8100	0,9771	177,2800	0,2048	151,8400
Gerador #G5	0,4424	184,2100	1,0000	0,0000	0,1365	160,7000
Gerador #G6	0,1892	-3,4621	0,0107	-149,6300	0,0390	225,6700
Gerador #G7	0,6744	189,1000	0,0096	69,6900	0,1612	55,0730
Gerador #G8	1,0000	0,0000	0,1089	-171,6000	0,2687	210,8100
Gerador #G9	0,9909	5,4290	0,1092	-162,0700	0,2757	214,5700
Gerador #G10	0,2902	213,1500	-	-	0,2352	177,1700

Tabela 3.19: Caso 1 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 1 (0,5854 Hz).

Local	Modo Identificado (Modo 1 - 0,5854Hz)	Frequência [Hz]	Resíduo	
			Módulo	Fase(°)
#G1	-2,4106 + 3,6998i	0,5888	0,3377	5,36
#G2	-2,3497 + 3,7280i	0,5933	0,3726	-2,17
#G3	-2,2042 + 3,6461i	0,5803	0,5675	-177,47
#G4	-2,3036 + 3,7496i	0,5968	0,3593	-5,00
#G5	-2,3795 + 3,6866i	0,5867	0,4212	4,04
#G6	-2,4162 + 3,7164i	0,5915	0,7102	-0,66
#G7	-2,2913 + 3,7160i	0,5914	1,0000	0,00
#G8	-2,4420 + 3,6981i	0,5886	0,6977	2,70
#G9	-2,3172 + 3,7005i	0,5890	0,7122	3,64
#G10	-2,1644 + 3,7021i	0,5892	0,7431	0,52

Tabela 3.20: Caso 2 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 2 (1,4256 Hz).

Local	Modo Identificado (Modo 2 - 1,4256 Hz)	Frequência [Hz]	Resíduo	
			Módulo	Fase(°)
#G8	-0,47786 + 8,9644i	1,4267	0,7464	-178,49
#G9	-0,46974 + 8,9544i	1,4251	1,0000	0,00

Tabela 3.21: Caso 3 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 3 (0,9200 Hz).

Local	Modo Identificado (Modo 3 - 0,9200Hz)	Frequência [Hz]	Resíduo	
			Módulo	Fase(°)
#G7	-0,2978 + 5,7539i	0,9158	1,0000	0,00
#G10	-0,2931 + 5,7731i	0,9188	0,9764	178,97

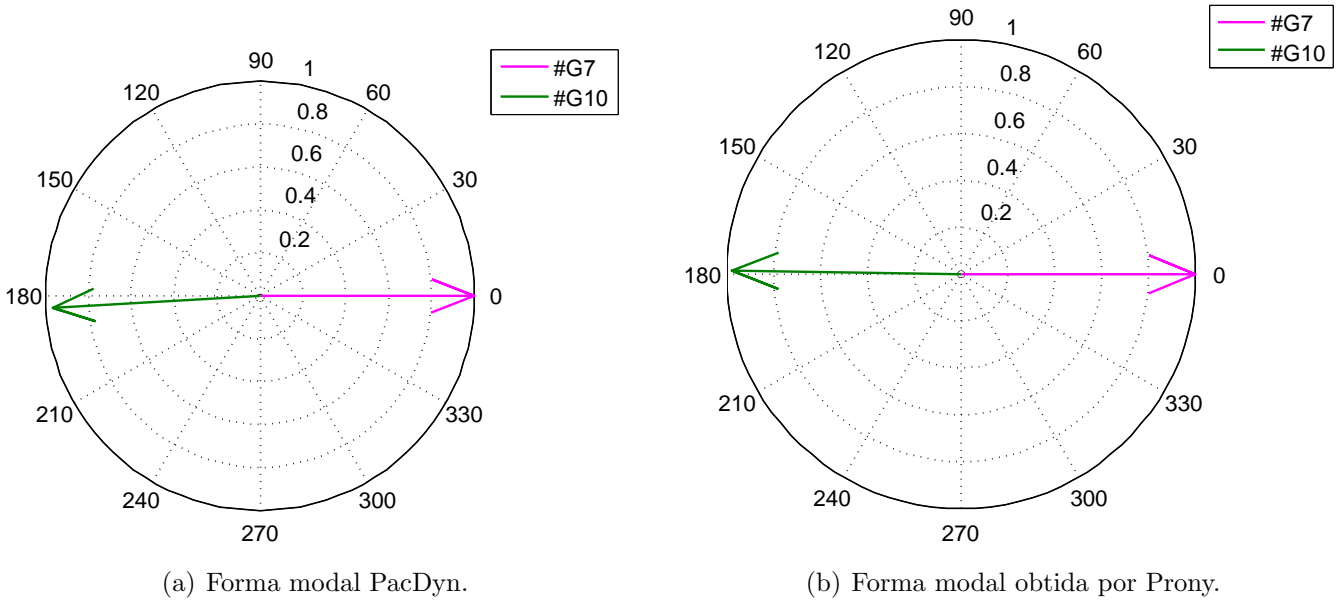


Figura 3.11: Caso 3 - Formas modais de velocidade do Modo 3 (0,9200 Hz).

Tabela 3.22: Caso 4 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 4 (1,3957 Hz).

Local	Modo Identificado (Modo 4 - 1,3957Hz)	Frequência [Hz]	Resíduo	
			Módulo	Fase(°)
#G1	-0,4109 + 8,8070i	1,4017	0,2207	171,16
#G6	-0,4068 + 8,6713i	1,3801	0,8484	176,69
#G8	-0,4130 + 8,7845i	1,3981	1,0000	0,00

Tabela 3.23: Caso 5 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 5 (0,9982 Hz).

Local	Modo Identificado (Modo 5 - 0,9982Hz)	Frequência [Hz]	Resíduo	
			Módulo	Fase(°)
#G4	-0,3075 + 6,2784i	0,9992	1,0000	0,00
#G5	-0,3074 + 6,2688i	0,9977	0,8446	-2,76
#G7	-0,2844 + 6,2585i	0,9961	0,7400	175,90
#G10	-0,2704 + 6,2790i	0,9993	0,6148	174,16

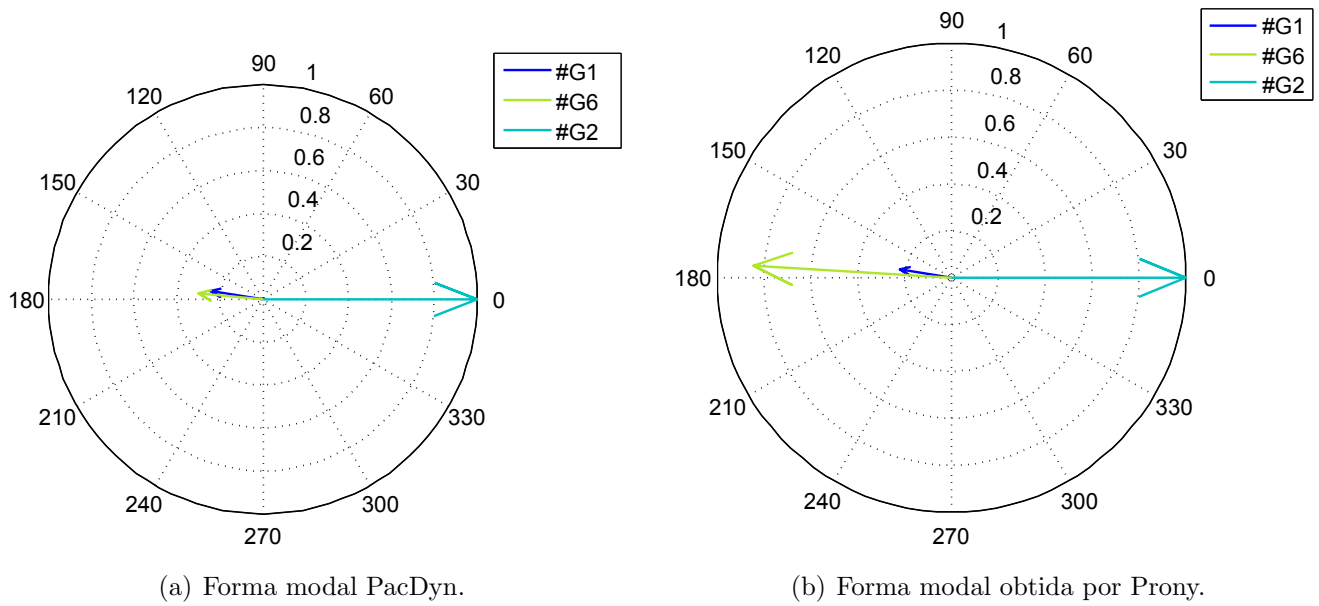


Figura 3.12: Caso 4 - Formas modais de velocidade do Modo 4 (1,3957 Hz).

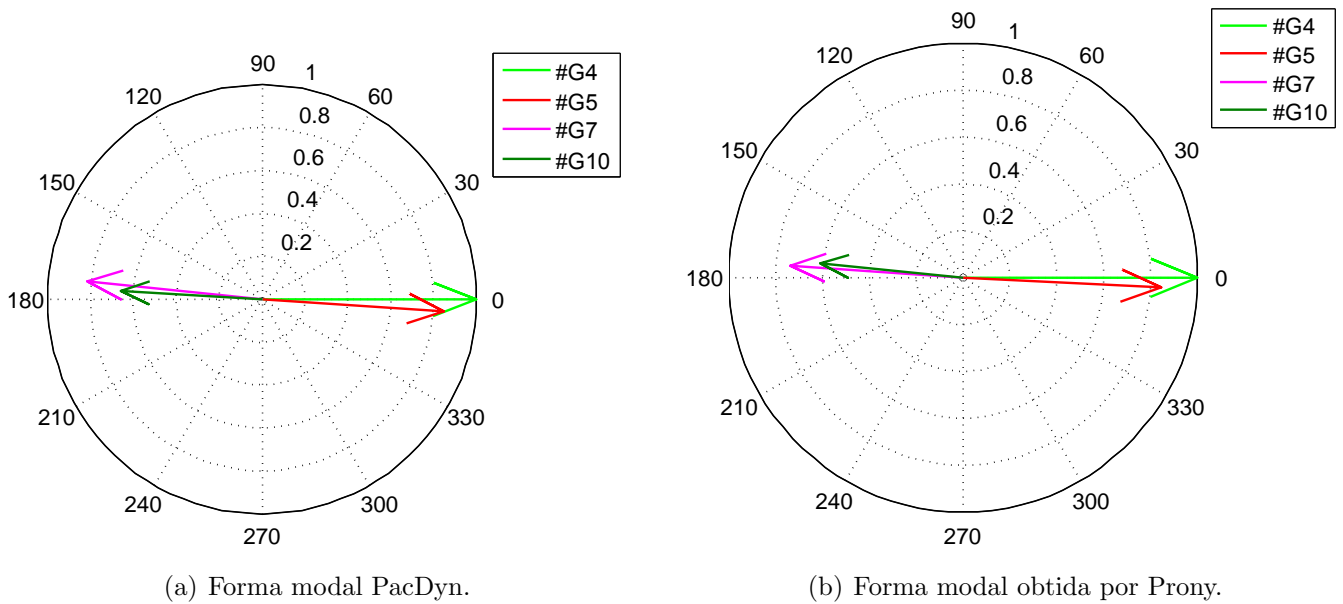


Figura 3.13: Caso 5 - Formas modais de velocidade do Modo 5 (0,9982 Hz).

Tabela 3.24: Caso 6 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 6 (1,3692 Hz).

Local	Modo Identificado (Modo 6 - 1,3692Hz)	Frequência [Hz]	Resíduo	
			Módulo	Fase(°)
#G2	-0,4173 + 8,7110i	1,3864	0,8337	2,30
#G6	-0,3417 + 8,5869i	1,3666	1,0000	0,00
#G7	-0,3548 + 8,5795i	1,3655	0,2894	-174,73
#G9	-0,4551 + 8,8407i	1,4070	0,7158	-183,72

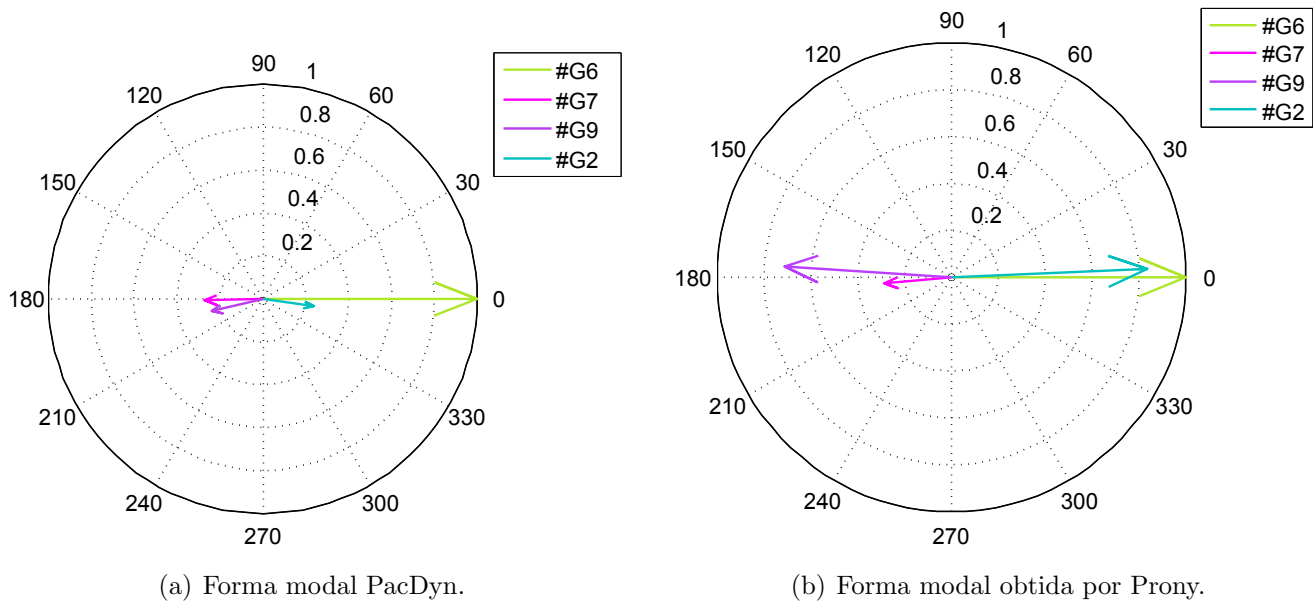


Figura 3.14: Caso 6 - Formas modais de velocidade do Modo 6 (1,3692 Hz).

Tabela 3.25: Caso 7 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 7 (1,1056 Hz).

Local	Modo Identificado (Modo 7 - 1,1056Hz)	Frequência [Hz]	Resíduo	
			Módulo	Fase(°)
#G4	-0,4427 + 6,7739i	1,0781	0,8131	-156,57
#G5	-0,3466 + 6,7846i	1,0798	0,5562	-180,33
#G7	-0,3129 + 6,9877i	1,1121	0,5971	-173,98
#G8	-0,3294 + 6,9655i	1,1086	1,0000	0,00
#G9	-0,3207 + 6,9660i	1,1087	0,9754	5,99

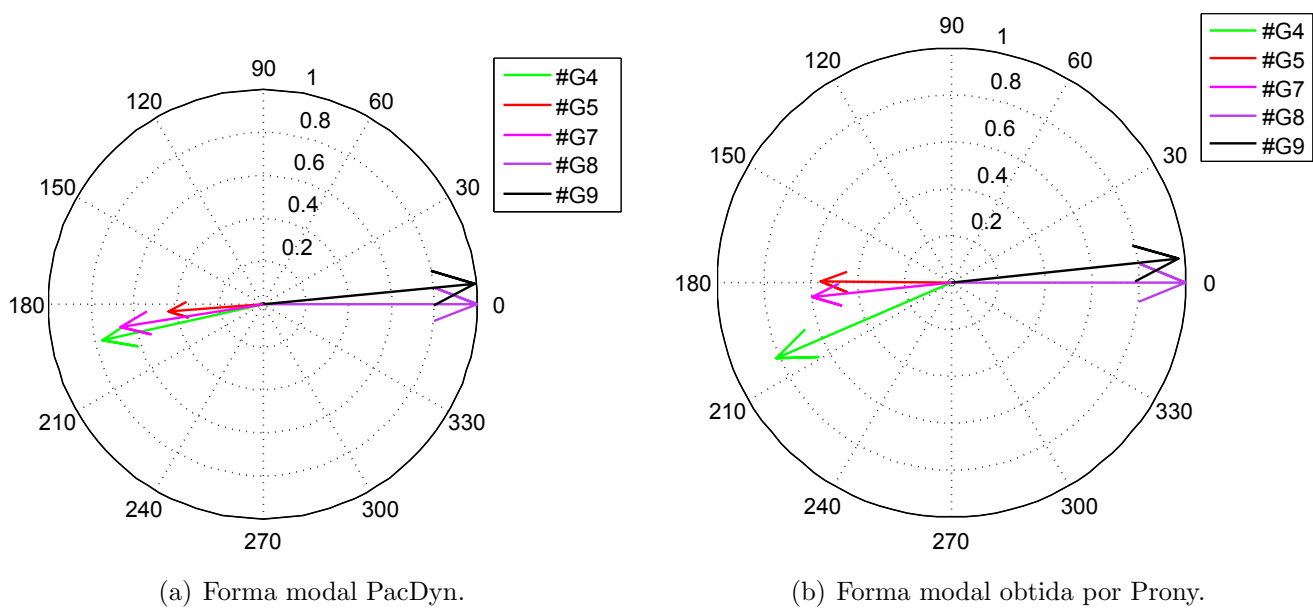


Figura 3.15: Caso 7 - Formas modais de velocidade do Modo 7 (1,1056 Hz).

Tabela 3.26: Caso 8 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 8 (1,1982 Hz).

Local	Modo Identificado (Modo 8 - 1,1982Hz)	Frequência [Hz]	Resíduo	
			Módulo	Fase(°)
#G4	-0,26807 + 7,5306i	1,1985	0,9036	-177,51
#G5	-0,30604 + 7,5300i	1,1984	1,0000	0,00

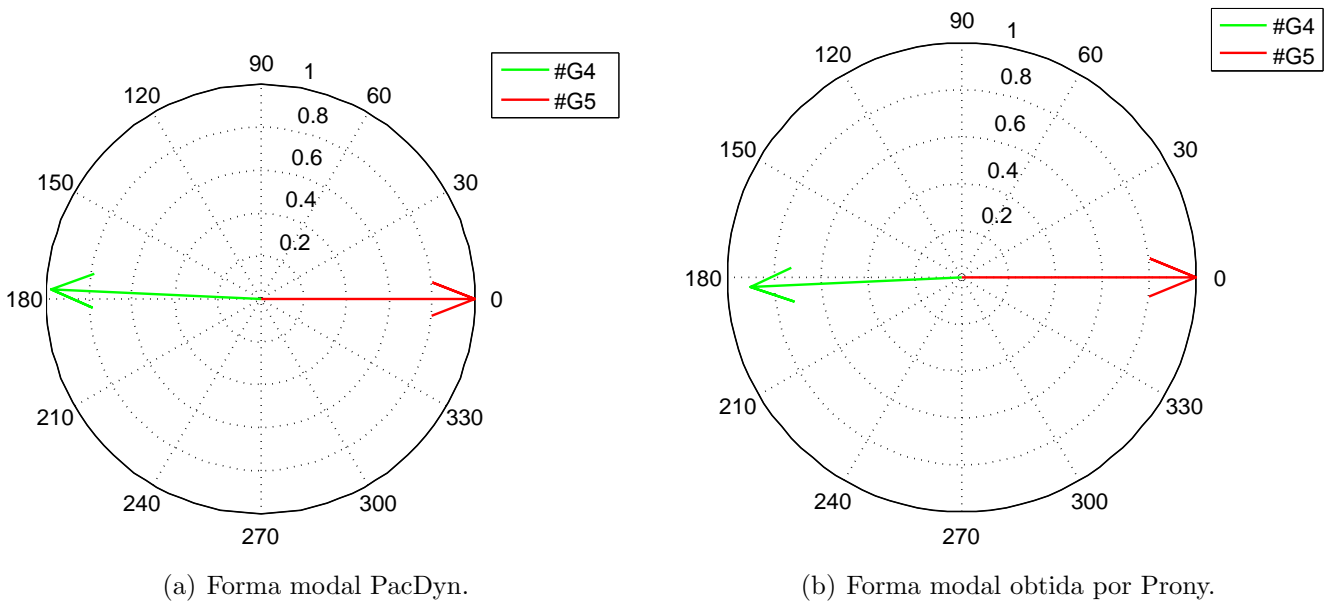


Figura 3.16: Caso 8 - Formas modais de velocidade do Modo 8 (1,1982 Hz).

Tabela 3.27: Caso 9 - Valores das formas modais de velocidade do Modo 9 (1,1281 Hz).

Local	Modo Identificado (Modo 9 - 1,1281Hz)	Frequência [Hz]	Resíduo	
			Módulo	Fase(°)
#G1	-0,0973 + 7,0883i	1,1281	1,0000	0,00
#G2	-0,0910 + 7,0769i	1,1263	0,3665	-12,90
#G4	-0,2073 + 7,1775i	1,1423	0,3286	-172,76
#G8	-0,2533 + 7,1373i	1,1359	0,4456	-178,72
#G9	-0,2010 + 7,1382i	1,1361	0,4020	-175,23
#G10	-0,0955 + 7,0686i	1,1250	0,2157	170,84

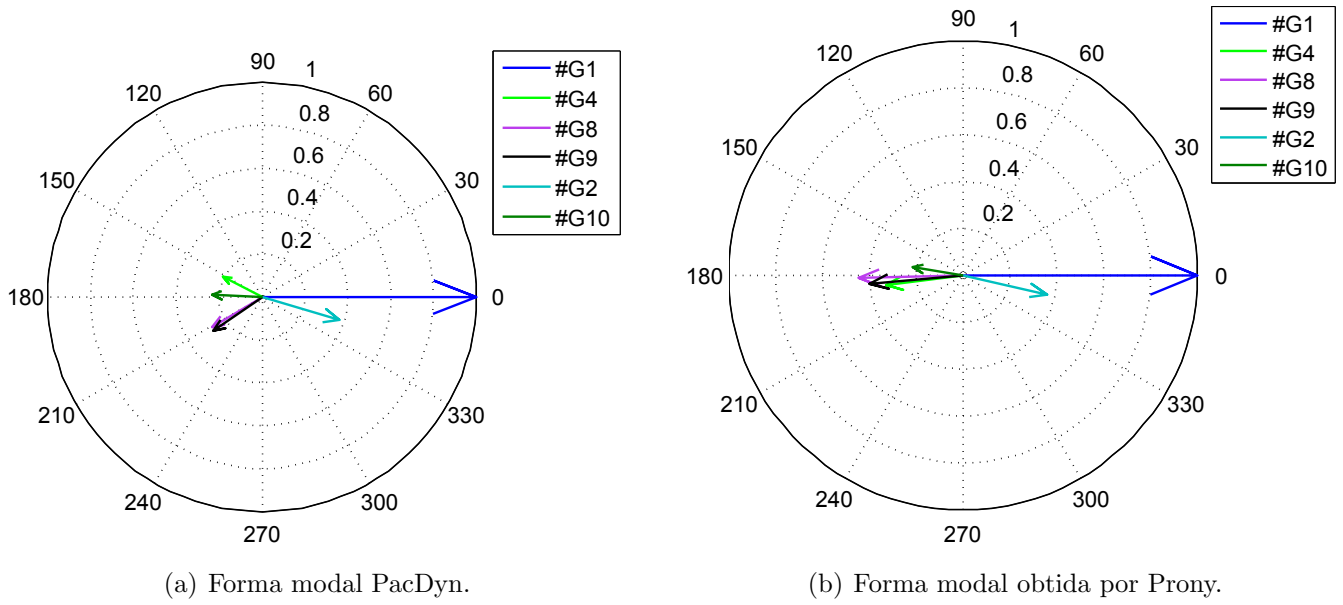


Figura 3.17: Caso 9 - Formas modais de velocidade do Modo 9 (1,1281 Hz).

3.2 Resultados dos Métodos PSD e CSD na Estimativa das Formas Modais

Esta seção apresenta alguns resultados da aplicação da teoria abordada, na Seção 2.3, em dois sistemas testes: Duas Áreas e *New England*.

As formulações dos casos dos sistemas Duas Áreas e *New England* foram realizadas a partir dos programas Anatem e PacDyn, respectivamente. Já foi apresentado que as formas modais dos dois sistemas são previamente conhecidos através do programa PacDyn, para comparação com os resultados obtidos.

3.2.1 Sistema Duas Áreas

Como visto anteriormente, o sistema Duas Áreas, Figura 3.5, possui quatro geradores e, portanto, três modos eletromecânicos de interesse, sendo dois modos locais (1,1383Hz e 1,2743Hz) e um modo interáreas (0,6825Hz). As formas modais associadas a estes modos também são conhecidas e são mostradas na Figura 3.6.

A partir destas informações, observando-se os vetores de oscilações entre os geradores com participações mais significativas, foram definidas perturbações, conforme descrição das subseções seguintes, 3.2.1.1 e 3.2.1.2. O programa utilizado foi o Anatem.

3.2.1.1 Perturbações nos Sinais de Referência dos Reguladores de Tensão

Os seguintes casos foram estudados para perturbações nos sinais de referência dos reguladores de tensão:

Caso 1 ($V_{ref4} - V_{ref1}$) - Foram aplicadas uma perturbação de +5% na referência de tensão no gerador #G4 e outra perturbação de -5% na referência de tensão do gerador #G1.

Caso 2 ($V_{ref1} - V_{ref2}$) - Foram aplicadas uma perturbação de +5% na referência de tensão no gerador #G1 e outra perturbação de -5% na referência de

tensão do gerador #G2.

Caso 3 ($V_{ref3} - V_{ref4}$) - Foram aplicadas uma perturbação de +5% na referência de tensão no gerador #G3 e outra perturbação de -5% na referência de tensão do gerador #G4.

O Caso 1 tem a finalidade de identificar o modo de 0,6828 Hz. O Caso 2 foi criado intencionalmente para estimar o modo eletromecânico de 1,1383 Hz, modo local no qual o gerador #G1 oscila contra o gerador #G2. Seguindo o mesmo raciocínio, o Caso 3 foi criado para estimar o modo local de 1,2743 Hz, que por sua vez é caracterizado pelos geradores #G3 e #G4 em anti-fase.

A partir destas perturbações foram medidas as velocidades de todos os geradores, conforme Figura 3.18, onde $\Delta\omega_1$, $\Delta\omega_2$, $\Delta\omega_3$ e $\Delta\omega_4$ representam as velocidades nos geradores #G1, #G2, #G3 e #G4, respectivamente. Embora em todos os casos estudados tenham sido simulados 20s, a Figura 3.18 mostra curvas com apenas 10s de simulação, para melhor leitura e entendimento dos casos.

Observe que nas curvas da Figura 3.18 (a) as velocidades dos geradores #G1, #G3 e #G4 oscilam em fase entre os instantes 2s e 2,5s. Um pouco antes deste instante, entre 1,5 e 2s, a curva do gerador #G2 oscila ligeiramente em fase com as demais. Entre 3s e 4s, os geradores #G2, #G3 e #G4 oscilam em fase e contra o gerador #G1. Vale ressaltar, que as amplitudes das curvas dos geradores #G3 e #G4 são muito maiores do que as dos geradores #G1 e #G2. Logo, as participações dos geradores #G3 e #G4 são as que definem a forma modal de velocidade do modo de 0,6825Hz.

Note que na Figura 3.18 (b), que entre 2s e 3s não são bem definidas as oscilações entre as curvas. As curvas #G1, #G3 e #G4 oscilam em fase. A curva #G1 não está bem definida neste intervalo. As amplitudes das curvas #G3 e #G4 são bem maiores do que as das curvas #G1 e #G2, fazendo com que os geradores #G3 e #G4 possuam maiores participações.

Repare que na Figura 3.18 (c), entre os instantes 1s e 1,5s, os geradores #G2, #G3 e #G4 oscilam em fase e contra o gerador #G1. Mais adiante, entre 2s e 2,5s

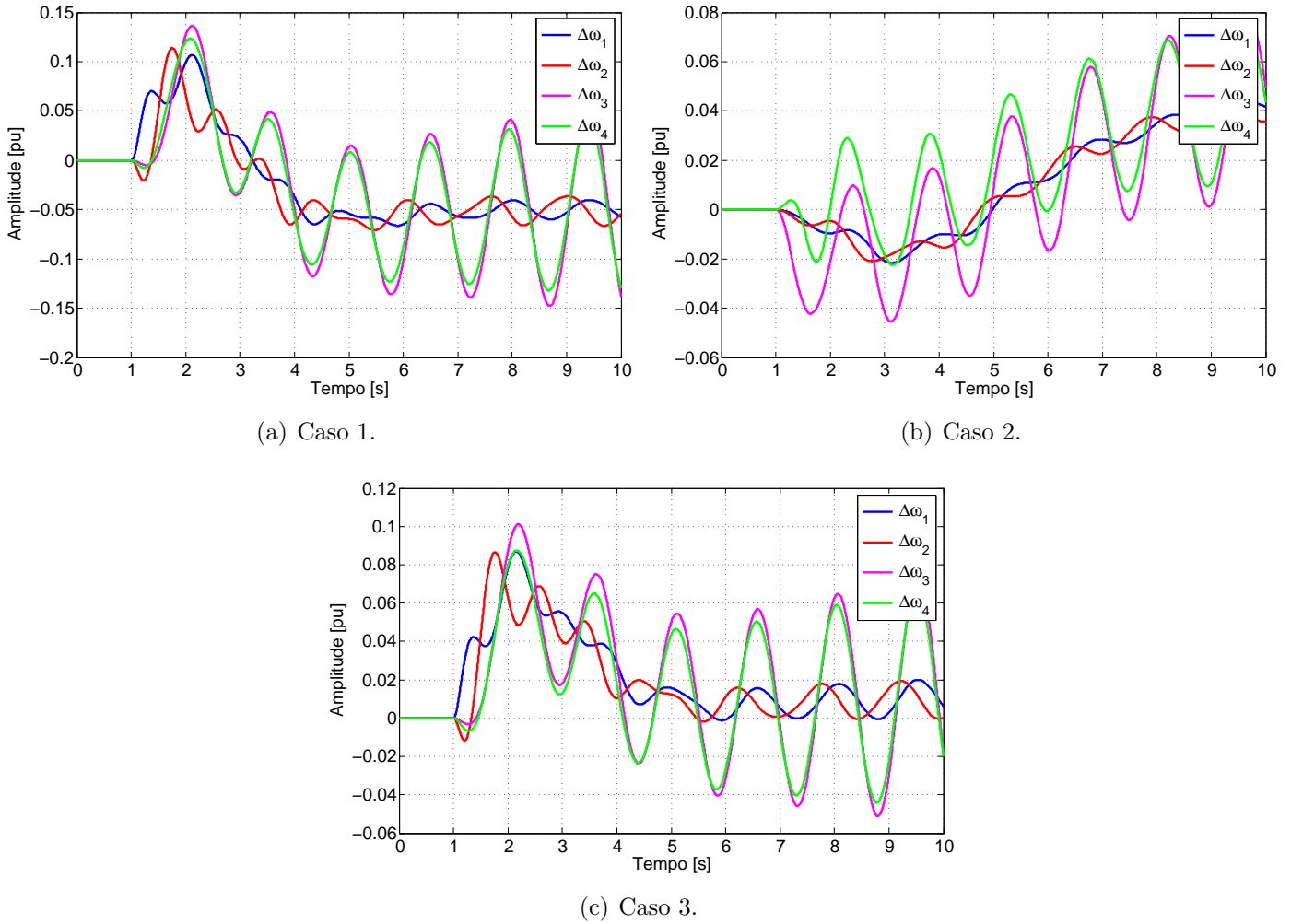


Figura 3.18: Curvas de velocidades dos geradores em pu.

pode-se notar que #G1, #G3 e #G4 oscilam contra #G2. Entre 3s e 4s, #G3 e #G4 ora oscilam em fase com #G1, ora com #G2. Entre 4,5s e 5,5s, todas as curvas oscilam em fase.

A conclusão que se chega a partir dessas observações acerca das curvas de velocidade dos geradores, para cada caso criado, é que embora o resultado dos métodos de PSD e CSD possam não coincidir com os resultados do PacDyn, não se pode assumir necessariamente uma situação de erro do método.

Por exemplo, na identificação Modo 2, não estimar a oscilação entre os geradores #G1 e #G2, não significa que o método não seja robusto. Repare que, na Figura 3.18 (b), ao longo de toda a curva, os geradores #G3 e #G4 possuem oscilações com amplitudes bem maiores que as os geradores #G1 e #G2. Isso, teoricamente,

deveria caracterizar um modo de oscilação entre os geradores #G3 e #G4.

Outro exemplo, para o Modo 3, não estimar a oscilação entre os geradores #G3 e #G4, também não significa que o método não seja robusto. Note que, na Figura 3.18 (c), entre os instantes 1 e 1,5s, as amplitudes das curvas dos geradores #G1 e #G2 são bem maiores que as dos geradores #G3 e #G4. Este comportamento caracterizaria um modo de oscilação entre os geradores #G1 e #G2.

• Resultados do Caso 1

As Figuras 3.19, 3.21 e 3.23 comparam os resultados das simulações do Caso 1 com as formas modais calculadas pelo PacDyn. Estas figuras representam as formas modais dos Modos 1, 2 e 3, respectivamente, conforme definido na Tabela 3.2.

As Figuras 3.20, 3.22 e 3.24 mostram as curvas fornecidas pelos métodos PSD e CSD, para os Modos 1, 2 e 3, na devida ordem. A amplitude do gráfico PSD está em dB, para melhor visualização do comportamento da curva. Os gráficos de PSD são idênticos para o mesmo caso. O que muda é o valor de amplitude coletado em cada frequência para estimar cada modo. Já os gráficos de CSD, são diferentes por serem calculados de acordo com a referência de cada modo.

A título de comparação foi escolhido como referência das formas modais a mesma referência adotada pelo do PacDyn, que por sua vez normaliza os vetores da forma modal em relação ao vetor de maior módulo.

Como discutido anteriormente, pode acontecer do maior vetor do PacDyn não ser o maior estimado pelo método PSD. Neste caso, os vetores teriam módulo maior que 1. Esta situação foi considerada, na implementação realizada, um caso de erro e, portanto, vetores nessa condição foram eliminados.

A Figura 3.19 (a) mostra que os métodos PSD e CSD estimaram de maneira precisa os valores da forma modal do Modo 1, embora os vetores de interesse sejam apenas os dos geradores #G3 e #G4, por terem participações ou amplitudes muito maiores do que os vetores dos geradores #G1 e #G2. Visualmente, os gráficos das Figuras 3.19 (b) e 3.6 (a) são muito parecidos.

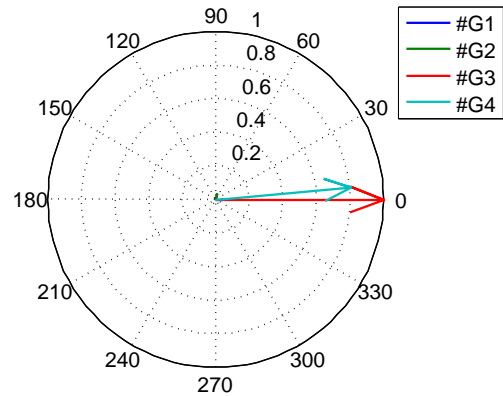
Da mesma maneira, pode-se observar na Figura 3.21 (a) que vetores da forma modal do Modo 2 também foram bem estimados. Vale lembrar que, embora os vetores das formas modais apareçam aos pares complexos e conjugados, o gráfico das formas modais mostra apenas um elemento deste par. Sendo assim, durante a análise das formas modais, o sinal do ângulo obtido pelo método não é de importância na definição dos vetores.

A Figura 3.23 (a) mostra que os resultados da forma modal do Modo 3 foram bem estimados, embora, nesta situação, tenha sido aplicado o caso de erro, como definido anteriormente. Ou seja, o maior vetor da forma modal estimado, não corresponde ao maior vetor da forma modal calculado pelo PacDyn. Sendo assim, os dois vetores com valores maiores que 1 foram desprezados no gráfico da forma modal. A Figura 3.24(a) mostra que, segundo o método PSD, os geradores #G2 e #G1 apresentam amplitudes maiores que o gerador #G4.

Baseando-se nestes resultados, pode-se concluir que para o Caso 1, ao realizar a perturbação $V_{ref4} - V_{ref1}$, foi possível identificar todos os modos do sistema.

Local	PacDyn		PSD		CSD	
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
#G1	0,1215	-5,97	0,0410	-0,39		
#G2	0,1333	88,76	0,0333	73,00		
#G3	1,0000	0,00	1,0000	0,00		
#G4	0,8801	5,20	0,8124	5,01		

(a) Valores das formas modais obtidos por PSD, CSD e PacDyn.



(b) Formas modais de velocidade obtidas por PSD e CSD.

Figura 3.19: Caso 1 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 1 (0,6825 Hz).

• Resultados do Caso 2

As Figuras 3.25, 3.26 e 3.27 mostram os resultados das simulações do Caso 2, a partir de um procedimento similar ao do Caso 1. Sendo assim, as curvas PSD

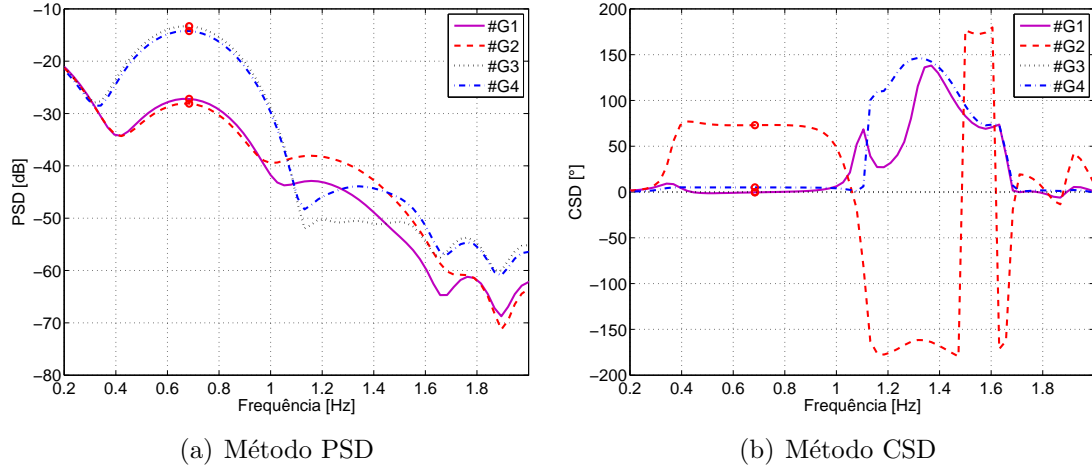
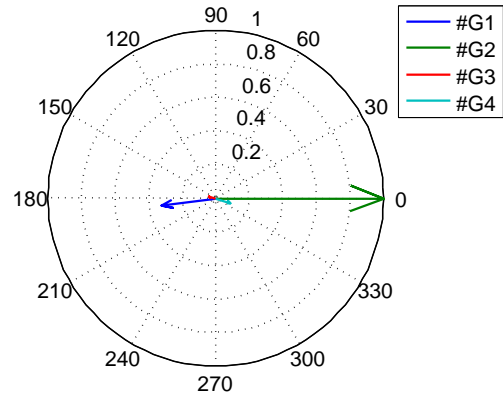


Figura 3.20: Caso 1 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD - Modo 1 (0,6825 Hz).

Local	PacDyn		PSD	CSD
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
#G1	0,6199	-169,94	0,3272	-172,66
#G2	1,0000	0,00	1,0000	0,00
#G3	0,0758	-163,18	0,0414	163,04
#G4	0,0832	20,41	0,0958	-18,84

(a) Valores das formas modais obtidos por PSD, CSD e PacDyn.



(b) Formas modais de velocidade obtidas por PSD e CSD.

Figura 3.21: Caso 1 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 2 (1,1383 Hz).

e CSD não são mostradas. Neste caso, também foi escolhido como referência das formas modais a mesma referência adotada pelo PacDyn.

A partir de uma análise análoga à do Caso 1, observou-se que Modo 1 teve uma boa precisão de módulo e ângulo, sobretudo nos vetores de interesse, os dos geradores #G3 e #G4.

O Modo 2 caiu na condição de erro, na qual o maior vetor estimado do método não corresponde ao maior vetor calculado pelo PacDyn. Mesmo assim, o método identificou bem que os geradores #G1 e #G2 oscilam em anti-fase.

O Modo 3 foi bem estimado em todos os vetores, embora a aproximação do

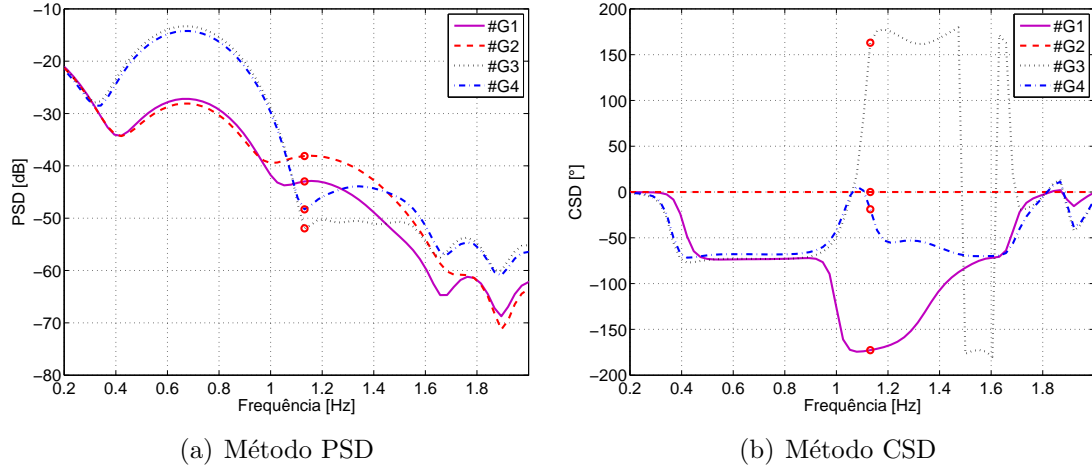
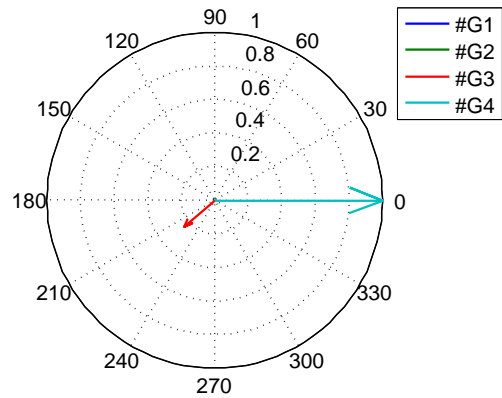


Figura 3.22: Caso 1 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD - Modo 2 (1,1383 Hz).

Local	PacDyn		PSD	CSD
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
#G1	0,0363	108,67	0,0000	0,17
#G2	0,0888	-52,73	0,0000	53,33
#G3	0,2261	188,97	0,2398	-139,50
#G4	1,0000	0,00	1,0000	0,00

(a) Valores das formas modais obtidos por PSD, CSD e PacDyn.



(b) Formas modais de velocidade obtidas por PSD e CSD.

Figura 3.23: Caso 1 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 3 (1,2743 Hz).

módulo do vetor do gerador #G3 não tenha sido muito boa.

• Resultados do Caso 3

Os resultados do Caso 3 possuem comportamentos muito semelhantes aos dos Casos 1 e 2. As curvas resultantes dos Métodos PSD e CSD também não são mostradas. Os Modos 1 e 2 foram bem identificados e o Modo 3 caiu na condição de erro.

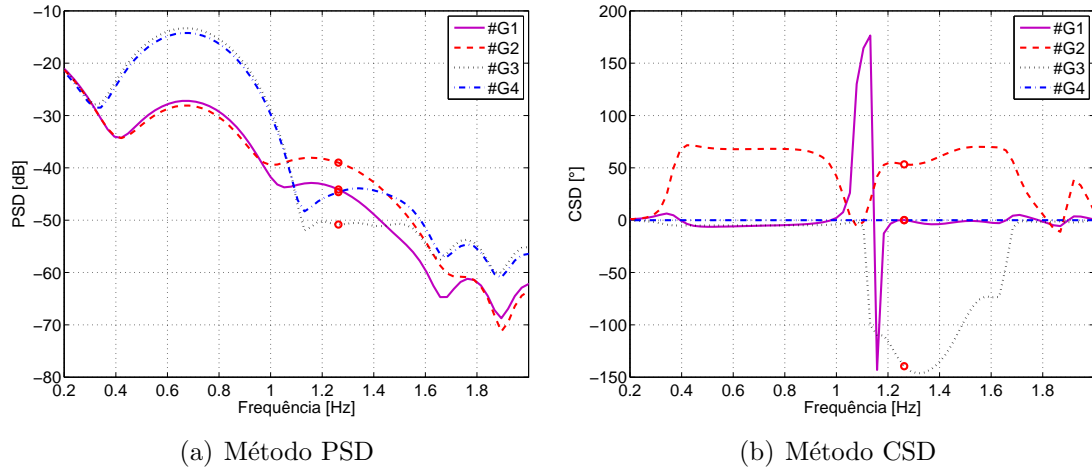
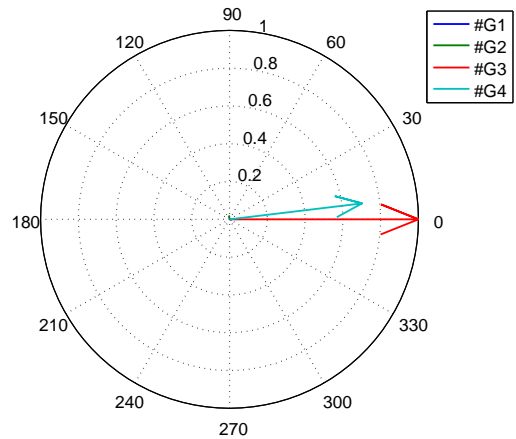


Figura 3.24: Caso 1 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD - Modo 3 (1,2743 Hz).

Local	PacDyn		PSD	CSD
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
#G1	0,1215	-5,97	0,0096	-7,75
#G2	0,1333	88,76	0,0161	97,49
#G3	1,0000	0,00	1,0000	0,00
#G4	0,8801	5,20	0,7064	6,87

(a) Valores das formas modais obtidos por PSD, CSD e PacDyn.



(b) Formas modais de velocidade obtidas por PSD e CSD.

Figura 3.25: Caso 2 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 1 (0,6825 Hz).

3.2.1.2 Curto-Circuito

Uma vez que os Métodos PSD e CSD tenham respondido de maneira satisfatória aos Casos 1, 2 e 3, ainda pretendendo-se investigar o desempenho destes métodos, foram criados os três casos seguintes:

Caso 4 - Foi aplicado um curto-circuito na barra #1, com duração de 100ms.

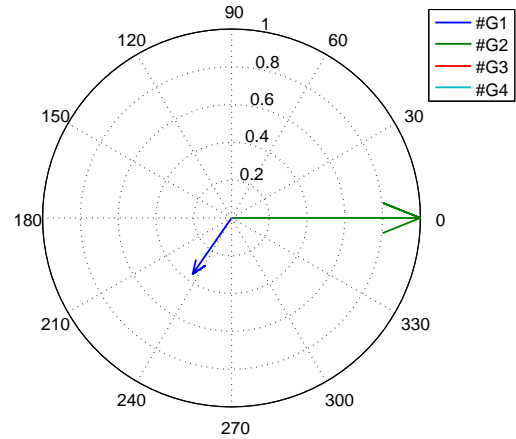
Caso 5 - Foi aplicado um curto-circuito na barra #3, com duração de 100ms.

Caso 6 - Foi aplicado um curto-circuito na barra #8, com duração de 200ms.

Os Casos 4, 5 e 6 foram criados, propositalmente, para identificar os modos de

Local	PacDyn		PSD		CSD	
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
#G1	0,6199	-169,94	0,3606	-124,74		
#G2	1,0000	0,00	1,0000	0,00		
#G3	0,0758	-163,18	0,0000	-113,06		
#G4	0,0832	20,41	0,0000	-61,62		

(a) Valores das formas modais obtidos por PSD, CSD e PacDyn.

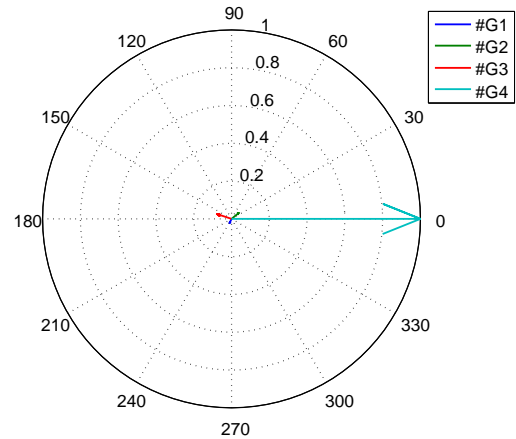


(b) Formas modais de velocidade obtidas por PSD e CSD.

Figura 3.26: Caso 2 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 2 (1,1383 Hz).

Local	PacDyn		PSD		CSD	
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
#G1	0,0363	108,67	0,0237	-115,72		
#G2	0,0888	-52,73	0,0494	39,38		
#G3	0,2261	188,97	0,0807	161,42		
#G4	1,0000	0,00	1,0000	0,00		

(a) Valores das formas modais obtidos por PSD, CSD e PacDyn.



(b) Formas modais de velocidade obtidas por PSD e CSD.

Figura 3.27: Caso 2 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 3 (1,2743 Hz).

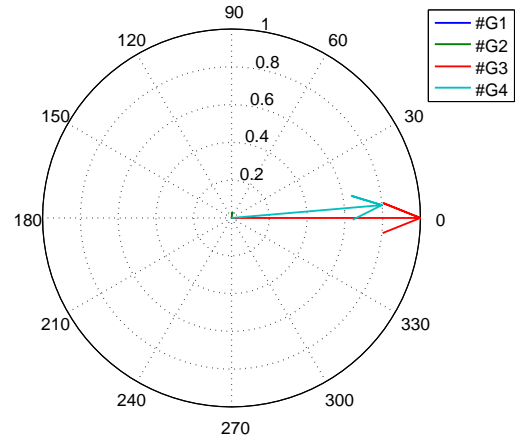
1,1383Hz (local), 1,2743Hz (local) e 0,6825Hz(interáreas), respectivamente.

A duração do defeito no Caso 6 foi de 200ms, pois com 100ms (como aplicado nas outras barras) não foi possível identificar nenhum modo, por gerar curvas muito lisas, sem ondulações, o que impossibilita a identificação de oscilações eletromecânicas. No entanto, ao aplicar 200ms nas barras #1 e #3, além do sistema tornar-se instável, foi gerado um curto vetor de pontos (curvas), com duração de aproximadamente 3s, impossibilitando a análise das formas modais.

Nestes casos, foi adotado como referência o gerador que possui o maior módulo

Local	PacDyn		PSD		CSD	
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
#G1	0,1215	-5,97	0,0267	-2,36	0,0267	-2,36
#G2	0,1333	88,76	0,0294	80,73	0,0294	80,73
#G3	1,0000	0,00	1,0000	0,00	1,0000	0,00
#G4	0,8801	5,20	0,7986	4,88	0,7986	4,88

(a) Valores das formas modais obtidos por PSD, CSD e PacDyn.

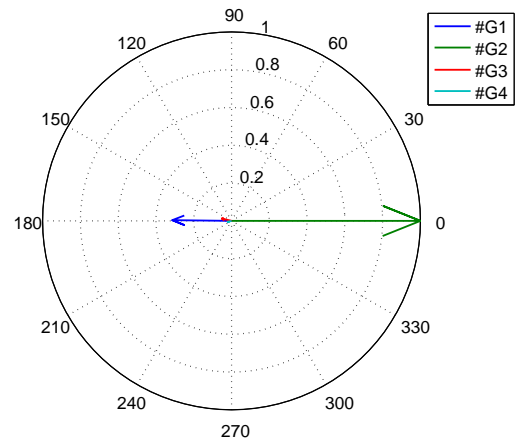


(b) Formas modais de velocidade obtidas por PSD e CSD.

Figura 3.28: Caso 3 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 1 (0,6825 Hz).

Local	PacDyn		PSD		CSD	
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
#G1	0,6199	-169,94	0,3133	179,29	0,3133	179,29
#G2	1,0000	0,00	1,0000	0,00	1,0000	0,00
#G3	0,0758	-163,18	0,0523	166,04	0,0523	166,04
#G4	0,0832	20,41	0,0200	-166,28	0,0200	-166,28

(a) Valores das formas modais obtidos por PSD, CSD e PacDyn.



(b) Formas modais de velocidade obtidas por PSD e CSD.

Figura 3.29: Caso 3 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 2 (1,1383 Hz).

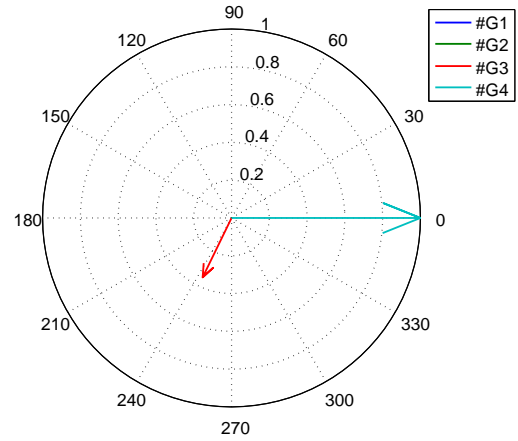
dentre os vetores de uma forma modal. Metodologia diferente dos Casos 1, 2 e 3, cujo o objetivo era comparar os resultados obtidos com os fornecidos pelo PacDyn, de maneira didática.

• Resultados do Caso 4

Os Modos 1 e 2 foram qualitativamente bem estimados, embora o método tenha errado a estimação dos vetores de baixa participação, que por sua vez são irrelevantes na leitura das formas modais. Foi identificado que no Modo 1 os geradores #G3 e

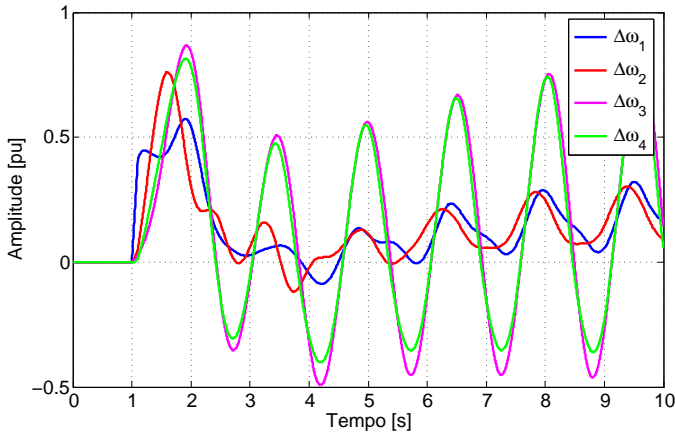
Local	PacDyn		PSD		CSD	
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
#G1	0,0363	108,67	0,0000	-126,09	0,0000	-126,09
#G2	0,0888	-52,73	0,0000	54,97	0,0000	54,97
#G3	0,2261	188,97	0,3494	-115,91	0,3494	-115,91
#G4	1,0000	0,00	1,0000	0,00	1,0000	0,00

(a) Valores das formas modais obtidos por PSD, CSD e PacDyn.

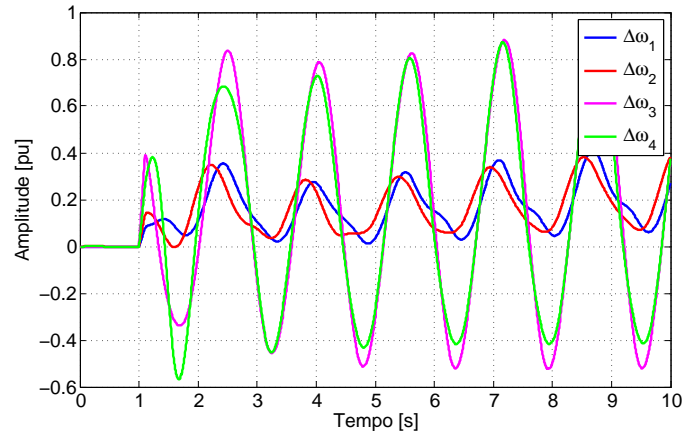


(b) Formas modais de velocidade obtidas por PSD e CSD.

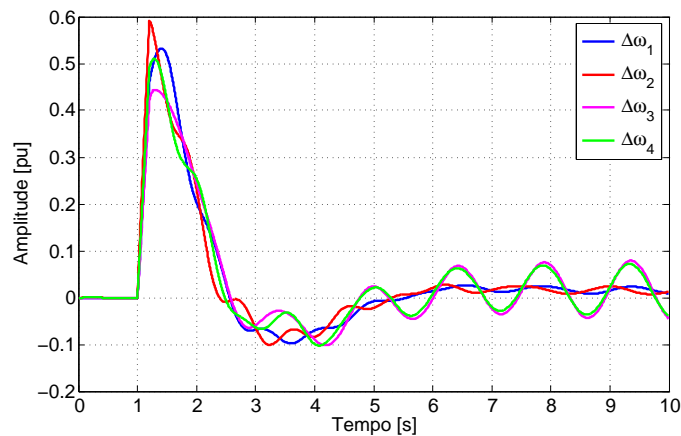
Figura 3.30: Caso 3 - Informações das formas modais de velocidade do Modo 3 (1,2743 Hz).



(a) Caso 4.



(b) Caso 5.



(c) Caso 6.

Figura 3.31: Curvas de velocidade dos geradores.

#G4 oscilam coerentes e com valores de amplitudes e ângulos próximos dos valores calculados pelo programa Pacdyn. Já no Modo 2 identificado, os geradores #G1 e #G2 oscilam em oposição e fase, conforme calculado pelo PacDyn. No entanto, pode ser observado uma diferença na amplitude do gerador #G2 de aproximadamente 0,2Hz, em relação ao valor calculado pelo PacDyn.

De acordo com o PacDyn, o Modo 3 é caracterizado pelas oscilações entre os geradores #G3 e #G4, em anti-fase. O método errou na estimativa deste modo, indicando os geradores #G1 e #G2 com maiores participações.

Pode-se observar na Figura 3.31 (a) que, em torno no instante 1,3s, as curvas das frequências dos geradores possuem amplitudes próximas, e os geradores #G1 e #G2 possuem amplitudes maiores que as dos geradores #G3 e #G4. Ainda que este comportamento seja descrito por um período muito curto da curva, em relação ao tamanho da mesma, ele pode ter sido o suficiente para influenciar a identificação do modo. Nota-se, também, que as curvas dos geradores #G1 e #G2 oscilam uma contra a outra, enquanto as curvas dos geradores #G3 e #G4, oscilam praticamente em fase.

As Figuras 3.32 (a), 3.32 (b) e 3.32 (c) mostram as formas modais obtidas dos Modos 1, 2 e 3, nesta ordem. A Figura 3.32 (c) mostra os vetores dos geradores #G3 e #G4 oscilando um contra o outro, porém com um valor de defasagem um pouco maior que os 90° . Este erro pode ser justificado pelo fato de as curvas dos geradores #G3 e #G4 estarem praticamente em fase, durante toda a amostra, conforme Figura 3.31 (a).

• Resultados do Caso 5

Ao realizar uma análise qualitativa entre os modos estimados e os calculados pelo PacDyn, pode-se dizer que o Modo 1 foi estimado de maneira satisfatória, Figura 3.33 (a), e o Modo 2 foi mal estimado, Figura 3.33 (b).

No Modo 2 estimado, o módulo do gerador #G3 aparece com maior amplitude do que o do gerador #G2, além dos geradores #G1 e #G2 estarem oscilando com uma

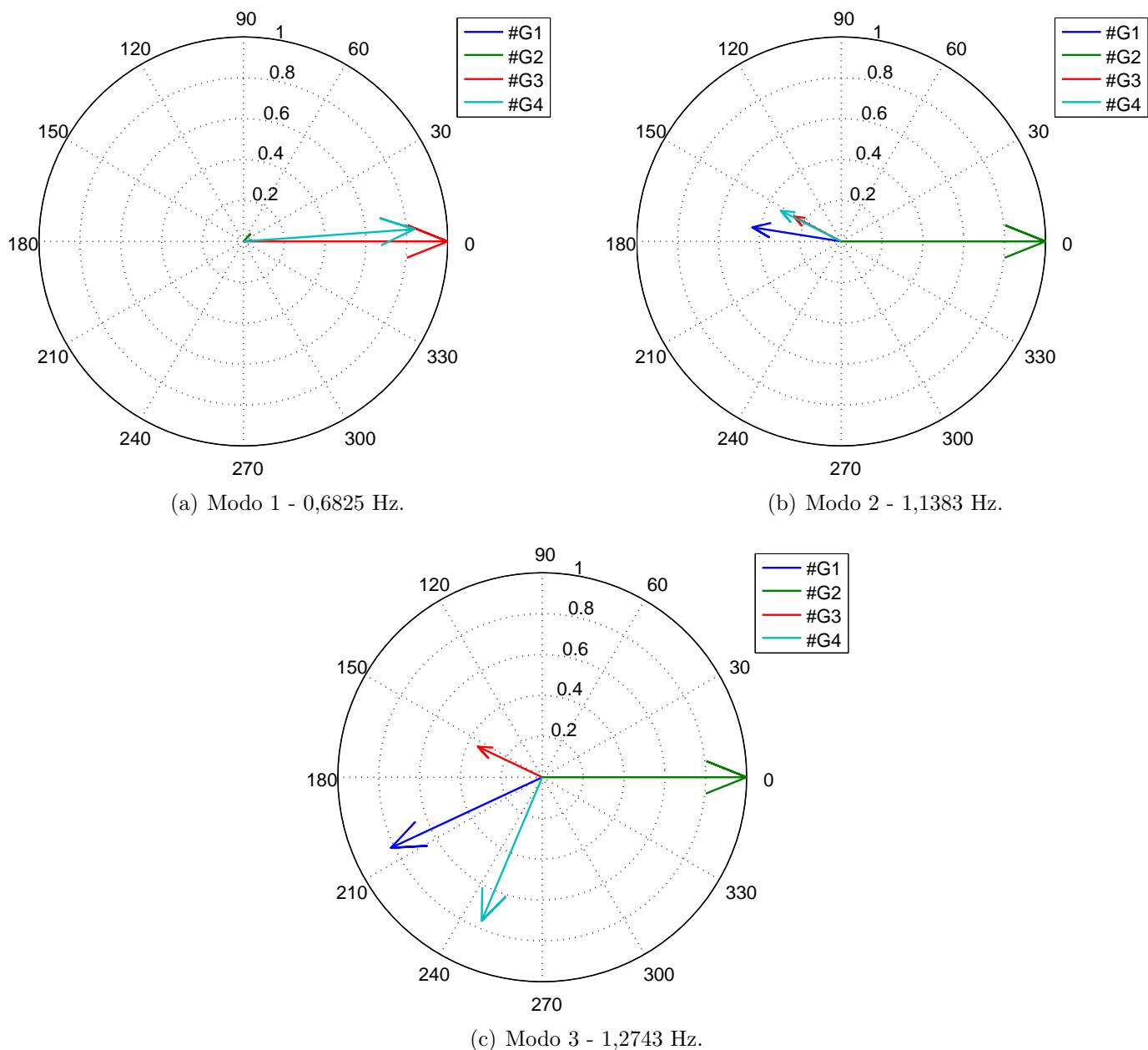


Figura 3.32: Caso 4 - Formas modais de velocidade.

defasagem de aproximadamente 50° entre eles. Estes resultados são incompatíveis com os calculados pelo PacDyn, mesmo seguindo uma análise qualitativa.

A Figura 3.31 (b) mostra que as amplitudes dos geradores #G1 e #G2 são consideravelmente inferiores às dos geradores #G3 e #G4, em torno de $1/4$. Além disso, estes pares oscilam praticamente em fase ao longo de quase toda a simulação. Este comportamento das curvas de dados dificulta a estimativa dos modos estudados e justifica os valores encontrados pelos métodos PSD e CSD.

A Figura 3.33 (c) mostra a forma modal do Modo 3. Esta estimaco identifica que os geradores #G3 e #G4 oscilam um contra o outro, embora com defasagem um pouco acima dos 90°. Este valor representa uma diferena de praticamente 100° em relao ao valor esperado. Além disso, o vetor do gerador #G4, segundo os cculos do PacDyn,  28 vezes maior que o vetor do gerador #G1 e 11 vezes maior que o vetor do gerador #G2, aproximadamente. Nos resultados obtidos, o vetor do gerador #G4 é ligeiramente menor que o vetor do gerador #G1 e 1,6 vezes maior que o vetor do gerador #G2. Sendo assim, estes resultados so considerados discrepantes em relao aos calculados pelo PacDyn.

• Resultados do Caso 6

As formais modais obtidas neste caso so mostradas na Figura 3.34. Seguindo uma anlise qualitativa, repare que os Modos 1 e 2 foram bem identificados, mas a estimaco do Modo 3 parece ruim,  primeira vista.

No Modo 3, segundo as formas modais do PacDyn, Figura 3.6(c), o gerador que tem a maior participao é o #G4. J o método PSD aponta o gerador #G2 com maior participao.

Ao longo da simulao, as curvas da Figura 3.31(c) têm um comportamento predominantemente caracterizado pelos geradores #G3 e #G4 oscilando em fase e com amplitudes bem superiores (cerca de sete vezes) aos dos geradores #G1 e #G2, que por sua vez oscilam um contra o outro, porém com uma pequena defasagem entre eles. Entretanto, entre os instantes 2,5 e 3s, é observado que os geradores #G3 e #G4 oscilam em antifase e com amplitudes menores que as dos geradores #G1 e #G2, que por sua vez também oscilam em antifase. Este comportamento pode justificar os resultados apontados pelos métodos PSD e CSD.

Além disso, repare que a Figura 3.34 mostra que embora o método tenha errado nas aproximaes de mdulo e ângulo, as características de oscilao do sistema so mantidas: #G1 oscila contra #G2 e #G3 oscila contra #G4. Tomando-se como exemplo o Modo 2 deste sistema, é mais fcil se obter sucesso na identificao deste

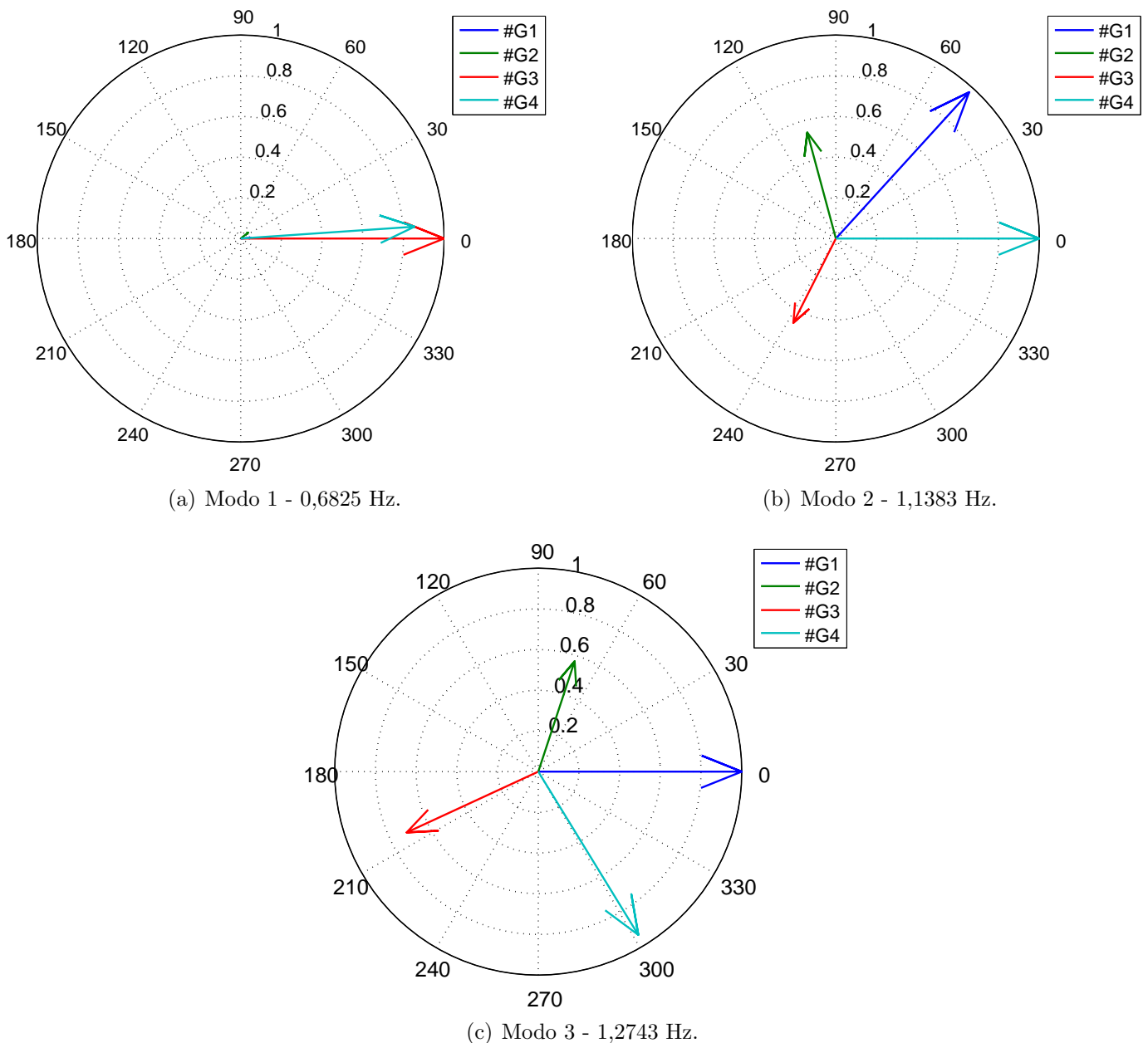


Figura 3.33: Caso 5 - Formas modais de velocidade.

modo, se a perturbação for dada na Área 1, pelo fato deste modo ser caracterizado pelas oscilações entre os geradores #G1 e #G2. Sendo assim, para esta mesma perturbação, a identificação do Modo 3 já pode ser dificultada.

- **Comentários Gerais Acerca do Sistema Duas Áreas**

Assim como no Método de Prony, os métodos PSD e CSD apresentam melhores resultados em casos de alta observabilidade do sistema.

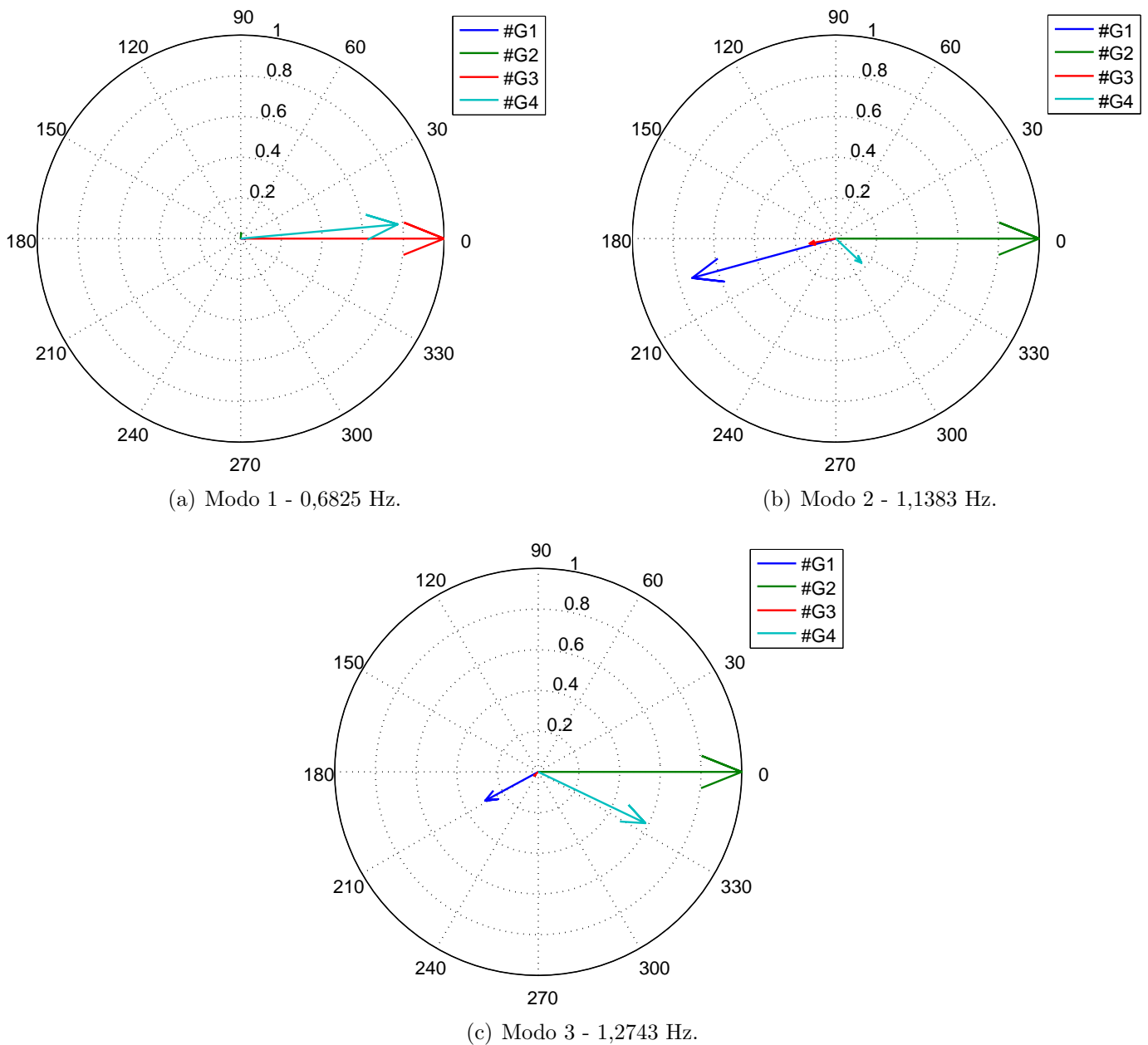


Figura 3.34: Caso 6 - Formas modais de velocidade.

Tomando-se como exemplo o modo local de 1,1383Hz, é mais fácil se obter sucesso na identificação deste modo, se a perturbação for dada na Área 1, pelo fato deste modo ser caracterizado pelas oscilações entre os geradores $G1$ e $G2$. Sendo assim, para esta mesma perturbação, a identificação do modo local de 1,2743Hz já pode ser dificultada.

Outro problema apresentado em todos os métodos analisados, Prony, PSD e CSD, é o fato dos polos que representam os modos de interesse possuírem valores

próximos. A diferença entre as frequências de 1,1383Hz e 1,2743Hz pode não ser o bastante para capturar o comportamento entre os Modos 2 e 3. Além disso, a parte real destes modos difere apenas na terceira casa decimal. Nas duas técnicas estudadas, houve uma certa dificuldade na identificação do Modo 3, de 1,2783Hz. Uma estratégia usada para contornar esta situação, nos métodos PSD e CSD, foi a diminuição do intervalo de amostragem dos pontos, para ter-se mais números de pontos e mais precisão nos valores das frequências.

Como o curto-circuito na barra #3 não foi o suficiente para a identificação do Modo 3, foi criado mais um caso aplicando-se um curto-circuito na barra #4. Como a barra #4 está 25km mais próxima da Área 1 do que a barra #3, os resultados foram ainda piores, continuando-se a estimar o Modo 3 como sendo um modo de oscilação entre os geradores #G1 e #G2, e não entre os geradores #G3 e #G4. Por este motivo, os resultados deste caso não foram apresentados com detalhes.

Ao estudar um sistema maior, como o *New England*, fica inviável tentar observar o comportamento de todos os modos do sistema a partir de um único distúrbio.

3.2.2 Sistema *New England*

O Sistema *New England* já apresentado na Seção 3.1.4, Figura 3.8, possui dez geradores e, portanto, nove modos eletromecânicos.

Para estimar as formas modais deste sistema foram usadas dois tipos de perturbações: degraus na tensão de referência (Seção 3.2.2.1) e degraus na potência mecânica dos geradores (Seção 3.2.2.2). O programa utilizado foi o PacDyn.

3.2.2.1 Degrau na Tensão de Referência

Para simulações com degrau na tensão de referência dos geradores, foram usados os mesmos casos, de 1 a 9, da Seção 3.1.4.1.

- **Resultados do Caso 1**

A Figura 3.35 mostra a comparação entre as formas modais do PacDyn e dos métodos de densidade espectral, para o modo de 0,5854Hz. A Tabela 3.25 deta-

lha esta informação com os valores coletados. A Figura 3.36 mostra as curvas dos métodos PSD e CSD, nas quais estão destacados os valores de módulo e ângulo de cada vetor da forma modal do Modo 1.

Tabela 3.28: Modo 1 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD *versus* PacDyn

Localização	PacDyn		PSD	CSD
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G1	0,3316	3,61	0,1135	-5,03
Gerador #G2	0,3742	0,27	0,1433	-4,69
Gerador #G3	0,5627	172,26	0,4512	-175,47
Gerador #G4	0,3672	0,32	0,1369	-4,84
Gerador #G5	0,4203	-0,54	0,1777	-5,71
Gerador #G6	0,6882	-0,60	0,4702	-2,41
Gerador #G7	1,0000	0,00	1,0000	0,00
Gerador #G8	0,6712	0,27	0,4427	-2,09
Gerador #G9	0,7088	1,20	0,4911	0,32
Gerador #G10	0,7655	-1,67	0,5754	-2,89

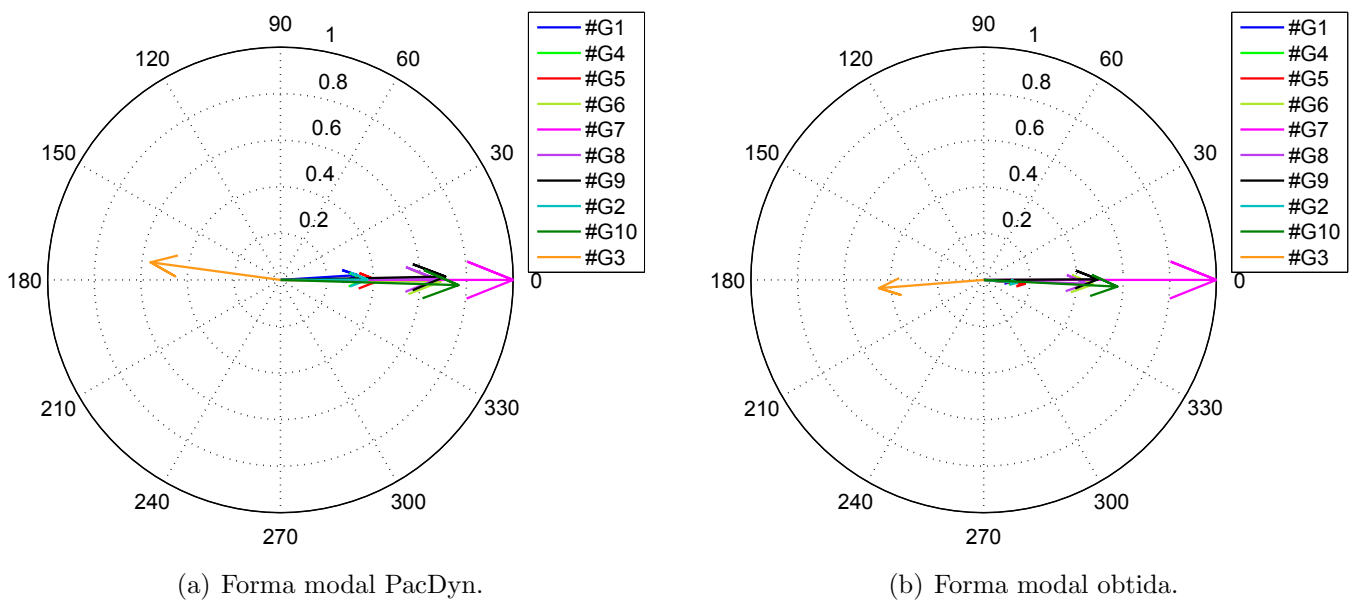


Figura 3.35: Caso 1 - Formas modais de velocidade do Modo 1 (0,5854 Hz).

• Resultados do Caso 2

A Figura 3.37 mostra a comparação entre as formas modais do PacDyn e dos métodos de densidade espectral, para o modo de 0,92Hz. A Tabela 3.26 detalha

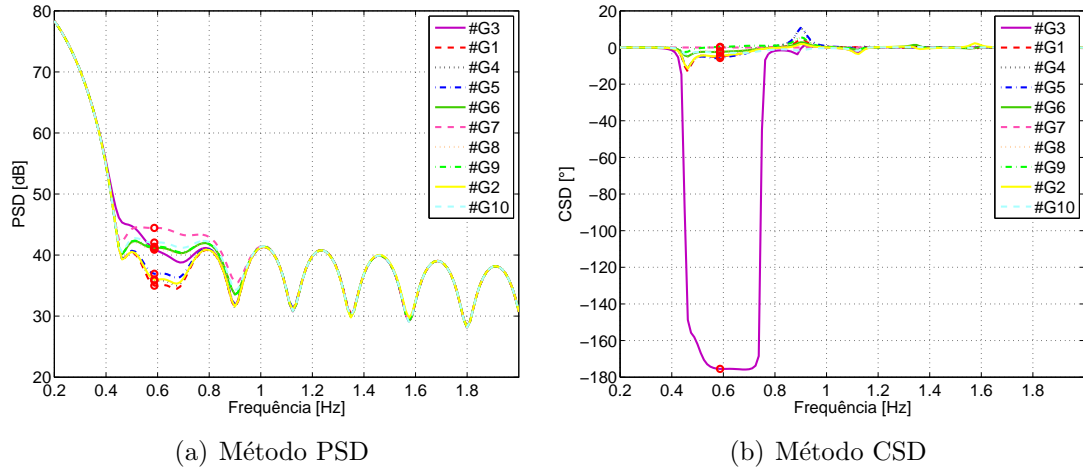


Figura 3.36: Caso 1 - Estimaco das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.

esta informao com os valores coletados. A Figura 3.38 mostra as curvas dos métodos PSD e CSD, nas quais esto destacados os valores de mdulo e ângulo de cada vetor da forma modal do Modo 2.

Tabela 3.29: Modo 2 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD *versus* PacDyn

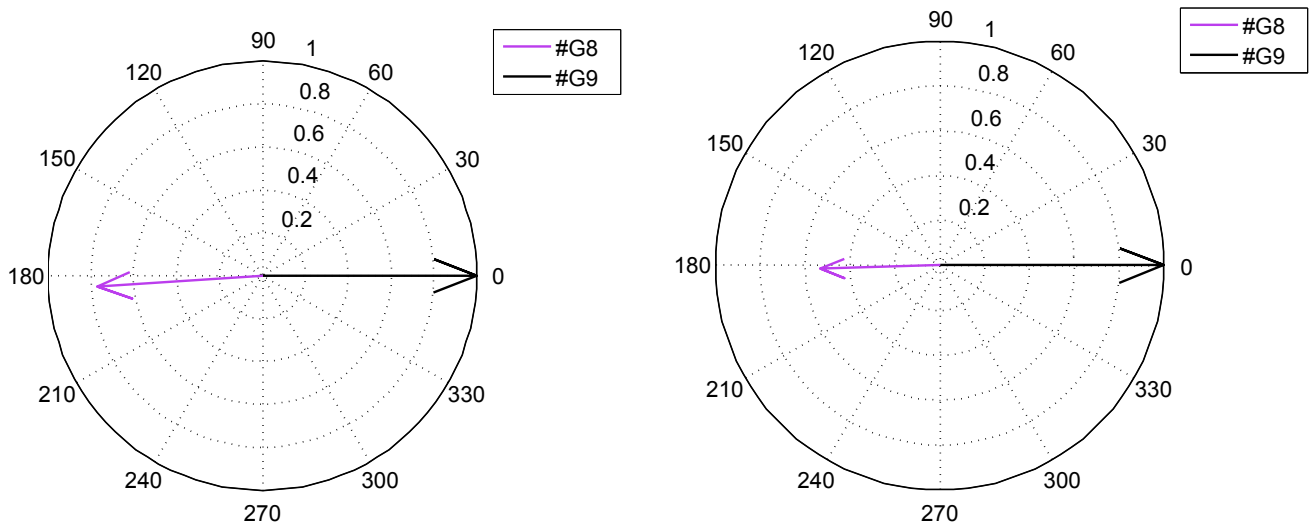
	PacDyn		PSD	CSD
Localizao	Mdulo	Fase (°)	Mdulo	Fase (°)
Gerador #G8	0,7695	183,94	0,5329	-178,36
Gerador #G9	1,0000	0,00	1,0000	0,00

• Resultados do Caso 3

A Figura 3.39 mostra a comparao entre as formas modais do PacDyn e dos métodos de densidade espectral, para o modo de 0,9982Hz. A Tabela 3.27 detalha esta informao com os valores coletados. A Figura 3.40 mostra as curvas dos métodos PSD e CSD, nas quais esto destacados os valores de mdulo e ângulo de cada vetor da forma modal do Modo 3.

• Resultados do Caso 4

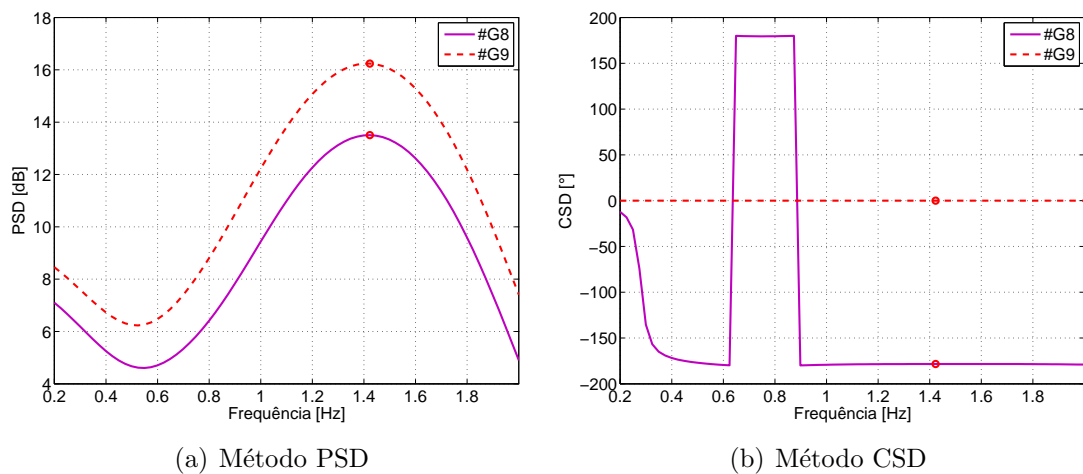
A Figura 3.41 mostra a comparao entre as formas modais do PacDyn e dos métodos de densidade espectral, para o modo de 1,1056Hz. A Tabela 3.28 detalha esta informao com os valores coletados. A Figura 3.42 mostra as curvas dos



(a) Forma modal PacDyn.

(b) Forma modal obtida.

Figura 3.37: Caso 2 - Formas modais de velocidade do Modo 2 (1,4256 Hz).



(a) Método PSD

(b) Método CSD

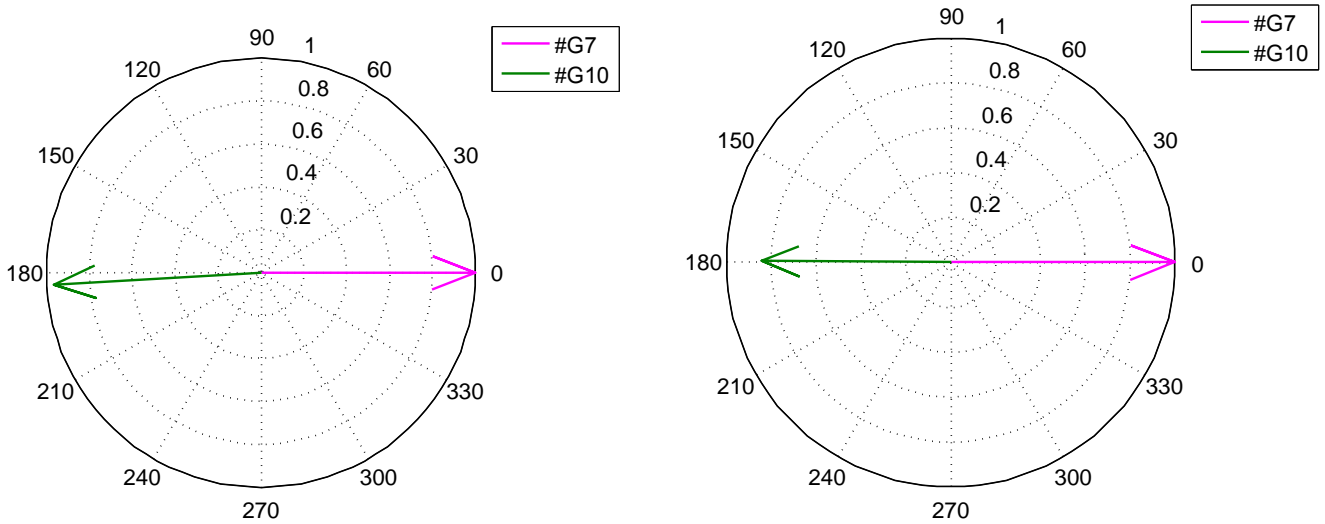
Figura 3.38: Caso 2 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.

Tabela 3.30: Modo 3 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD *versus* PacDyn

	PacDyn		PSD	CSD
Localização	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G7	1,0000	0,00	1,0000	0,00
Gerador #G10	0,9655	183,17	0,8436	179,47

métodos PSD e CSD, nas quais estão destacados os valores de módulo e ângulo de cada vetor da forma modal do Modo 4.

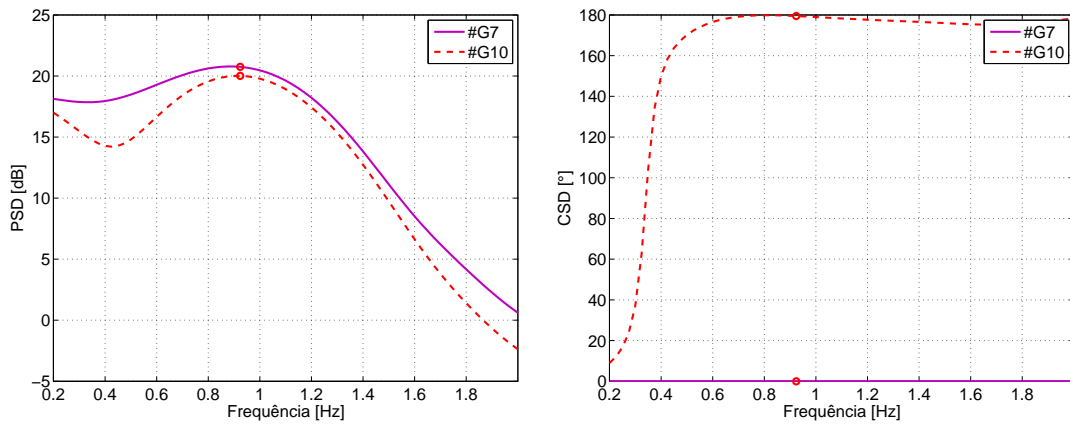
• **Resultados do Caso 5**



(a) Forma modal PacDyn.

(b) Forma modal obtida.

Figura 3.39: Caso 3 - Formas modais de velocidade do Modo 3 (0,9200 Hz).



(a) Método PSD

(b) Método CSD

Figura 3.40: Caso 3 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.

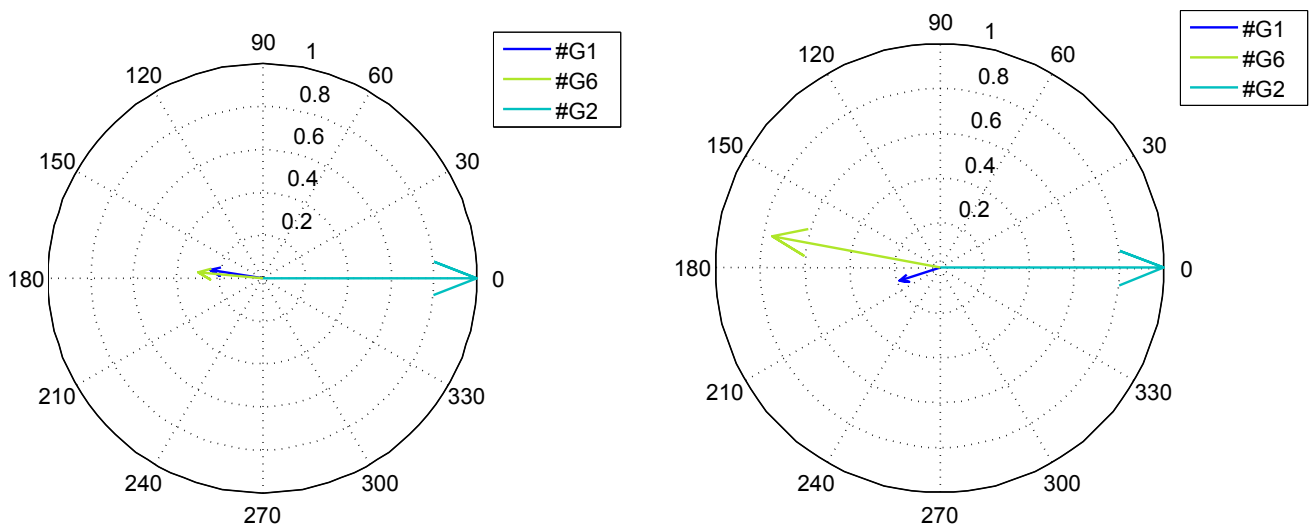
A Figura 3.43 mostra a comparação entre as formas modais do PacDyn e dos métodos de densidade espectral, para o modo de 1,1281Hz. A Tabela 3.29 detalha esta informação com os valores coletados. A Figura 3.44 mostra as curvas dos métodos PSD e CSD, nas quais estão destacados os valores de módulo e ângulo de cada vetor da forma modal do Modo 5.

• **Resultados do Caso 6**

A Figura 3.45 mostra a comparação entre as formas modais do PacDyn e dos métodos de densidade espectral, para o modo de 1,1281Hz. A Tabela 3.30 deta-

Tabela 3.31: Modo 4 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD *versus* PacDyn

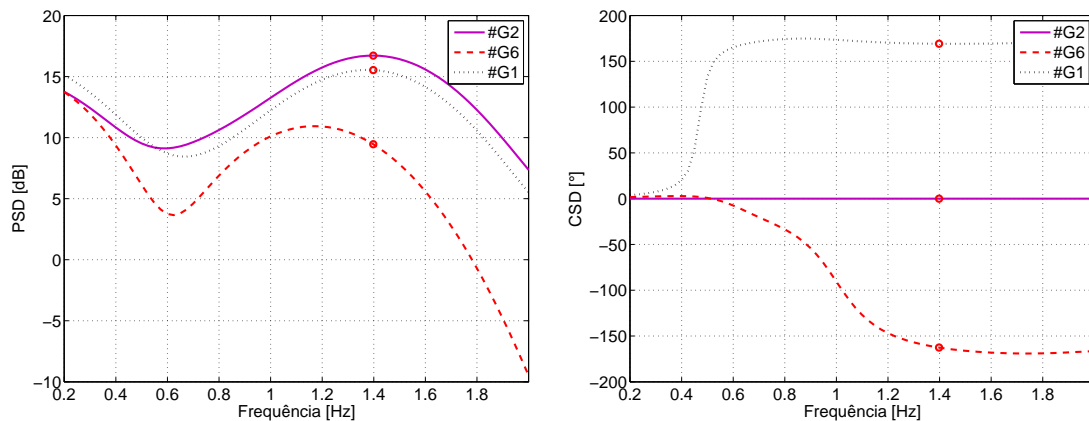
Localização	PacDyn		PSD	CSD
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G1	0,2486	170,62	0,1878	-162,55
Gerador #G2	1,0000	0,00	1,0000	0,00
Gerador #G6	0,3028	175,09	0,7607	169,14



(a) Forma modal PacDyn.

(b) Forma modal obtida.

Figura 3.41: Caso 4 - Formas modais de velocidade do Modo 4 (1,3957 Hz).



(a) Método PSD

(b) Método CSD

Figura 3.42: Caso 4 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.

Tabela 3.32: Modo 5 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD *versus* PacDyn

Localização	PacDyn		PSD	CSD
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G4	1,0000	0,00	1,0000	0,00
Gerador #G5	0,8512	-3,58	0,7053	-2,41
Gerador #G7	0,8195	174,12	0,5851	170,98
Gerador #G10	0,6592	176,68	0,4205	171,21

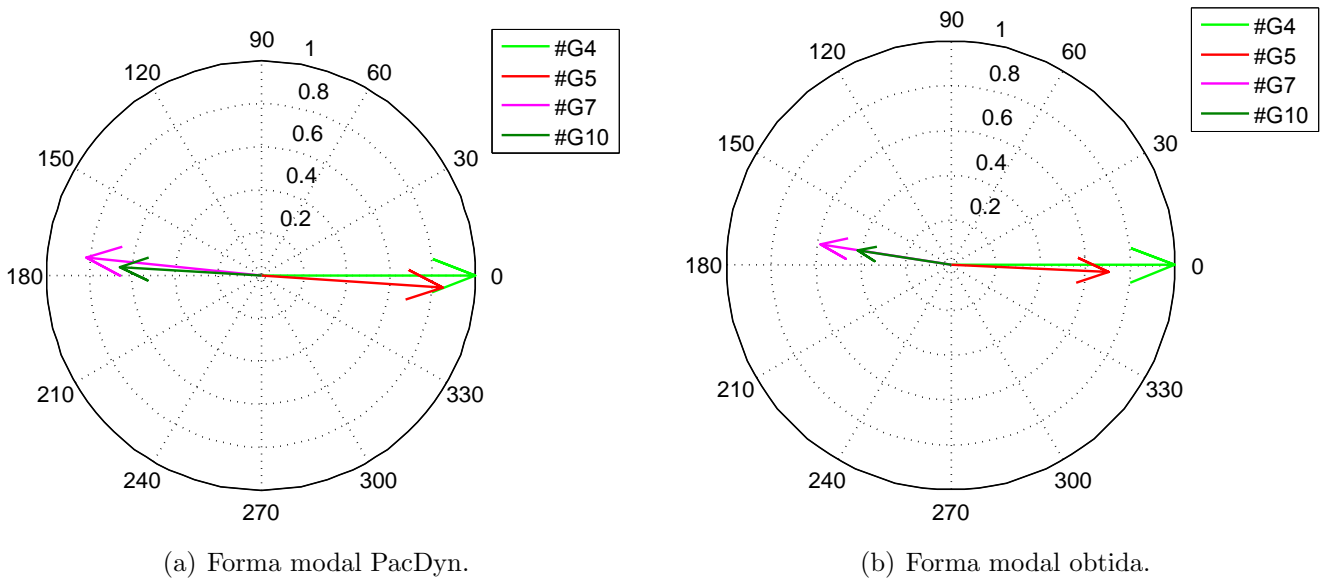


Figura 3.43: Caso 5 - Formas modais de velocidade do Modo 5 (0,9982 Hz).

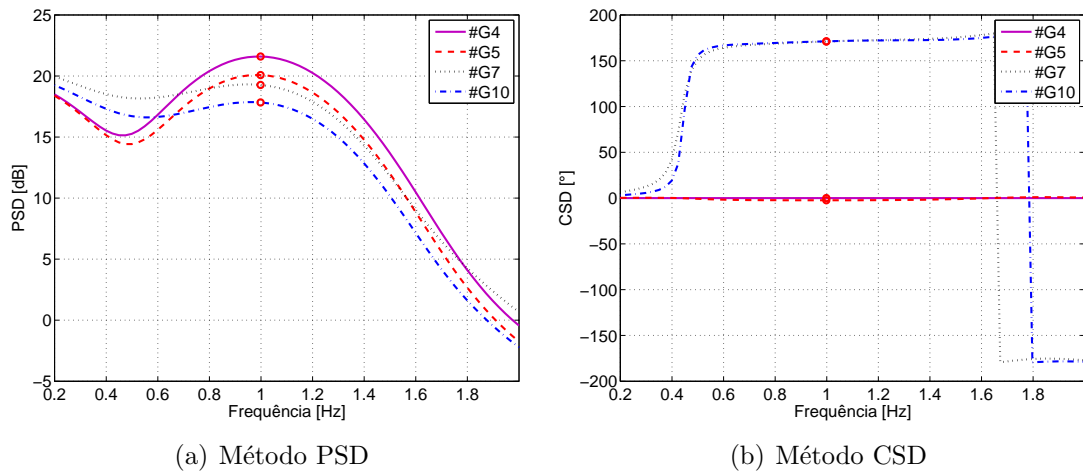


Figura 3.44: Caso 5 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.

lha esta informação com os valores coletados. A Figura 3.46 mostra as curvas dos métodos PSD e CSD, nas quais estão destacados os valores de módulo e ângulo de cada vetor da forma modal do Modo 5.

Tabela 3.33: Modo 6 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD *versus* PacDyn

Localização	PacDyn		PSD	CSD
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G2	0,2396	-8,33	0,5250	6,97
Gerador #G6	1,0000	0,00	1,0000	0,00
Gerador #G7	0,2720	181,01	0,2121	154,39
Gerador #G9	0,2473	193,48	0,3892	-167,79

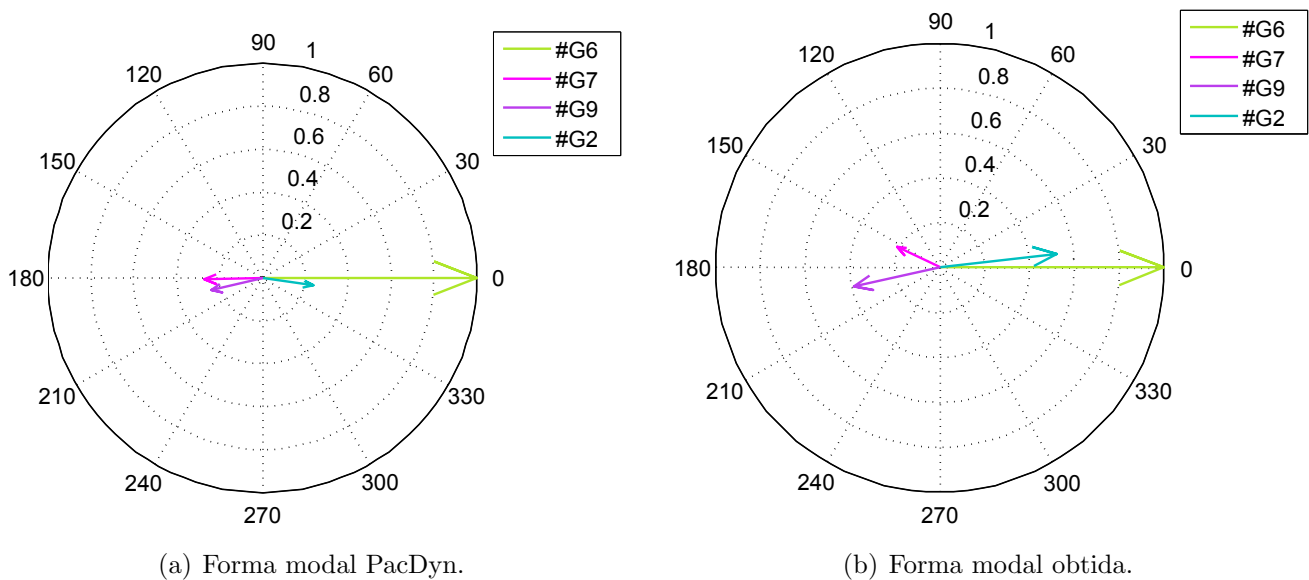


Figura 3.45: Caso 6 - Formas modais de velocidade do Modo 6 (1,3692 Hz).

• Resultados do Caso 7

A Figura 3.47 mostra a comparação entre as formas modais do PacDyn e dos métodos de densidade espectral, para o modo de 1,3692Hz. A Tabela 3.31 detalha esta informação com os valores coletados. A Figura 3.48 mostra as curvas dos métodos PSD e CSD, nas quais estão destacados os valores de módulo e ângulo de cada vetor da forma modal do Modo 7.

• Resultados do Caso 8

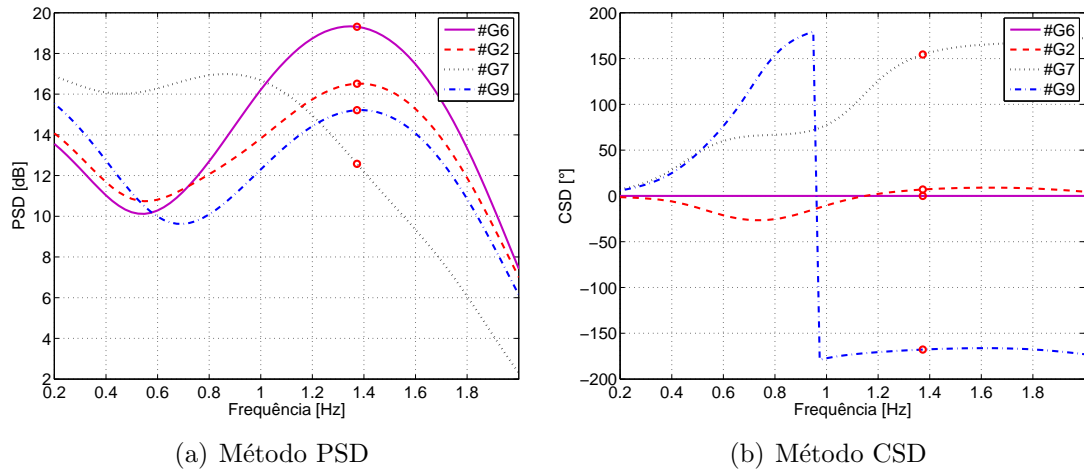


Figura 3.46: Caso 6 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.

Tabela 3.34: Modo 7 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD *versus* PacDyn

	PacDyn		PSD	CSD
Localização	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G4	0,7649	192,81	0,6946	166,24
Gerador #G5	0,4424	184,21	0,2638	169,61
Gerador #G7	0,6744	189,10	0,3628	179,96
Gerador #G8	1,0000	0,00	1,0000	0,00
Gerador #G9	0,9909	5,43	0,9752	8,98

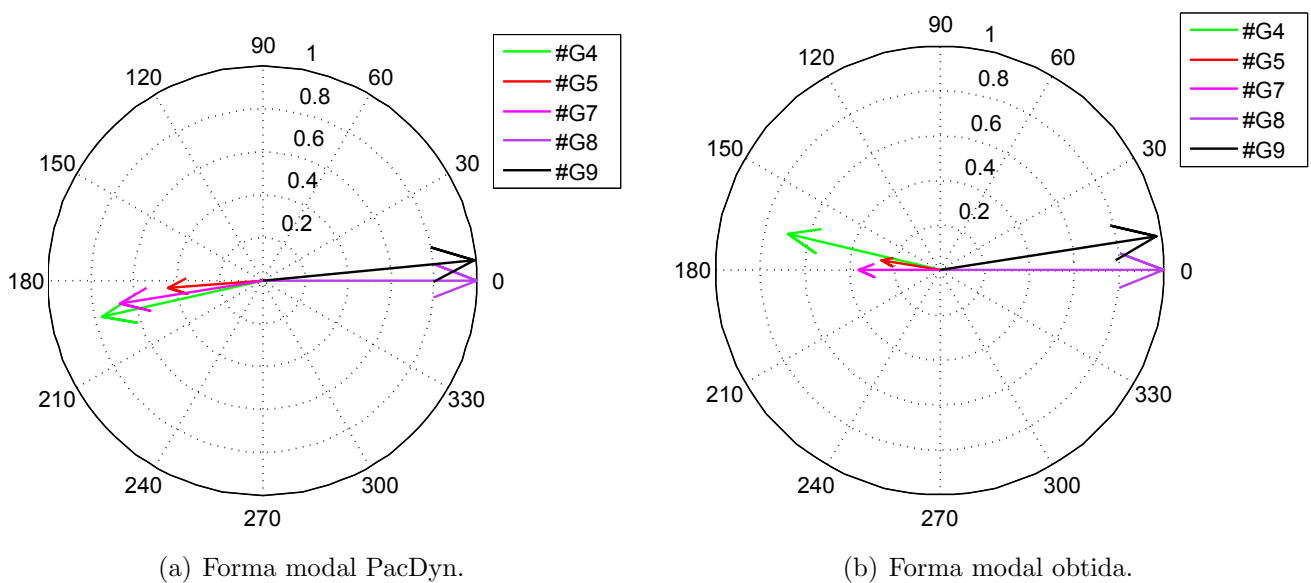


Figura 3.47: Caso 7 - Formas modais de velocidade do Modo 7 (1,1056 Hz).

A Figura 3.49 mostra a comparação entre as formas modais do PacDyn e dos métodos de densidade espectral, para o modo de 1,3957Hz. A Tabela 3.32 detalha esta informação com os valores coletados. A Figura 3.50 mostra as curvas dos métodos PSD e CSD, nas quais estão destacados os valores de módulo e ângulo de cada vetor da forma modal do Modo 8.

Tabela 3.35: Modo 8 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD *versus* PacDyn

Localização	PacDyn		PSD	CSD
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G4	0,9771	177,28	0,9859	-162,30
Gerador #G5	1,0000	0,00	1,0000	0,00

• Resultados do Caso 9

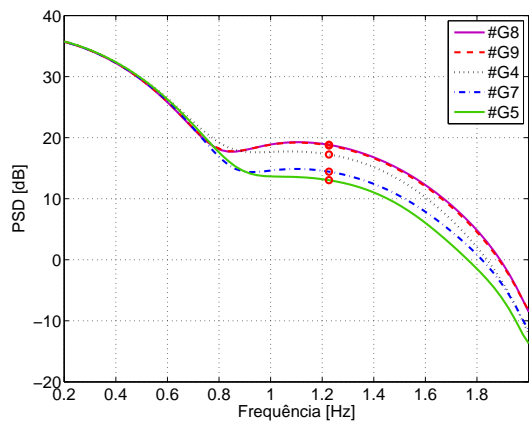
A Figura 3.51 mostra a comparação entre as formas modais do PacDyn e dos métodos de densidade espectral, para o modo de 1,4256Hz. A Tabela 3.33 detalha esta informação com os valores coletados. A Figura 3.52 mostra as curvas dos métodos PSD e CSD, nas quais estão destacados os valores de módulo e ângulo de cada vetor da forma modal do Modo 9.

Tabela 3.36: Modo 9 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD *versus* PacDyn

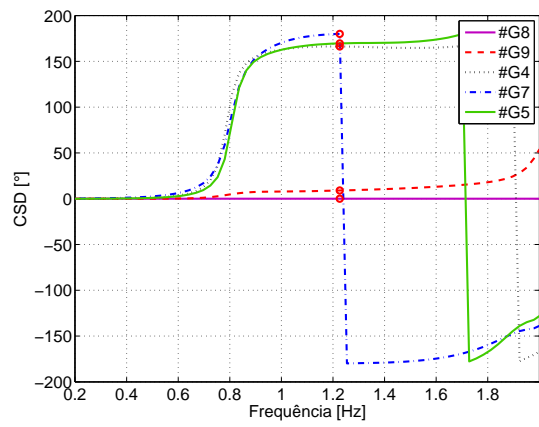
Localização	PacDyn		PSD	CSD
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G1	1,0000	0,00	1,0000	0,00
Gerador #G2	0,3792	-16,56	0,1852	-4,18
Gerador #G4	0,2048	151,84	0,0778	-153,59
Gerador #G8	0,2687	210,81	0,0717	-166,46
Gerador #G9	0,2757	214,57	0,0766	-157,45
Gerador #G10	0,2352	177,17	0,0457	-177,86

3.2.2.2 Degrau na Potência Mecânica dos Geradores

Foram criados os dois seguintes casos para estimar os Modos 5 e 9, aplicando-se perturbações nos reguladores de velocidade dos geradores, *Pmec*.

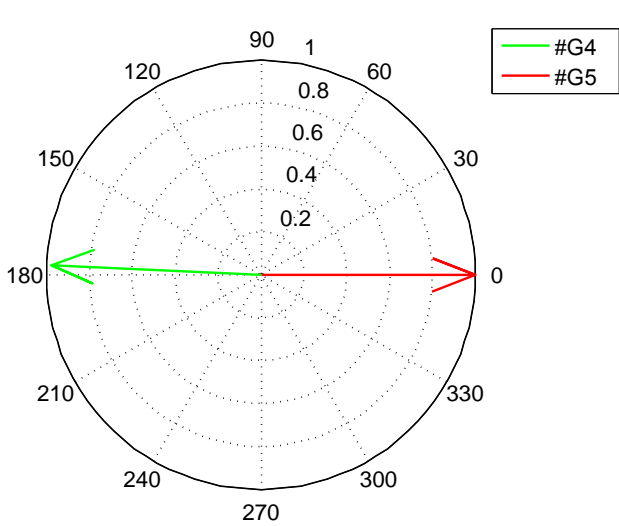


(a) Método PSD

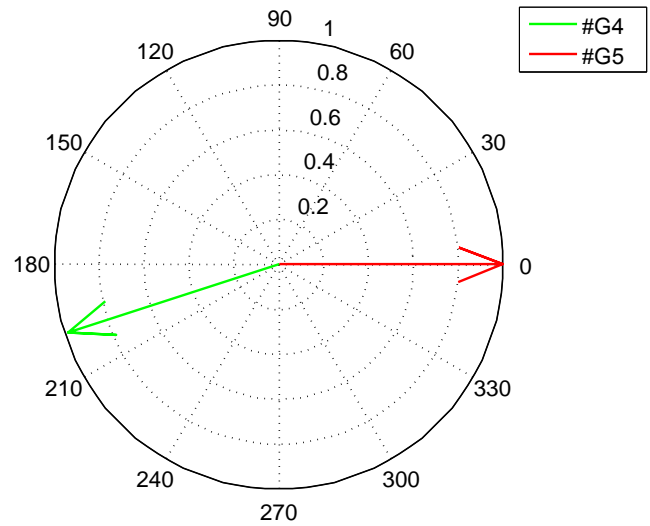


(b) Método CSD

Figura 3.48: Caso 7 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.

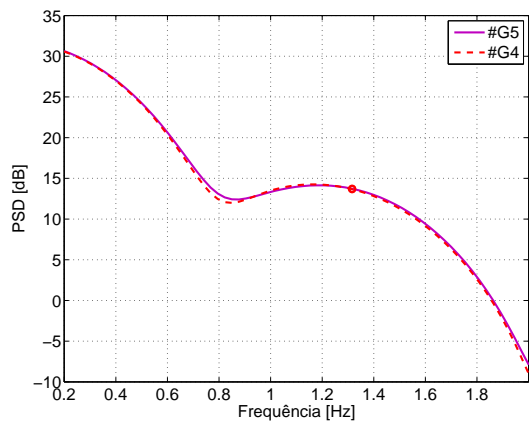


(a) Forma modal PacDyn.

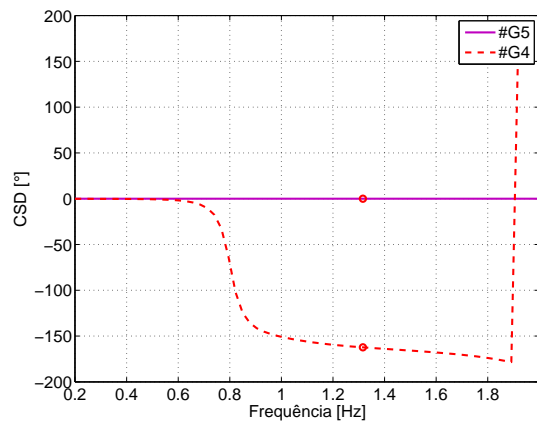


(b) Forma modal obtida.

Figura 3.49: Caso 8 - Formas modais de velocidade do Modo 8 (1,1982 Hz).

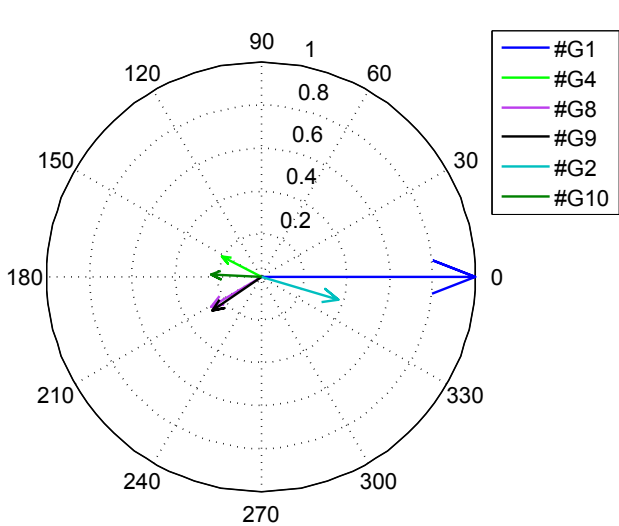


(a) Método PSD

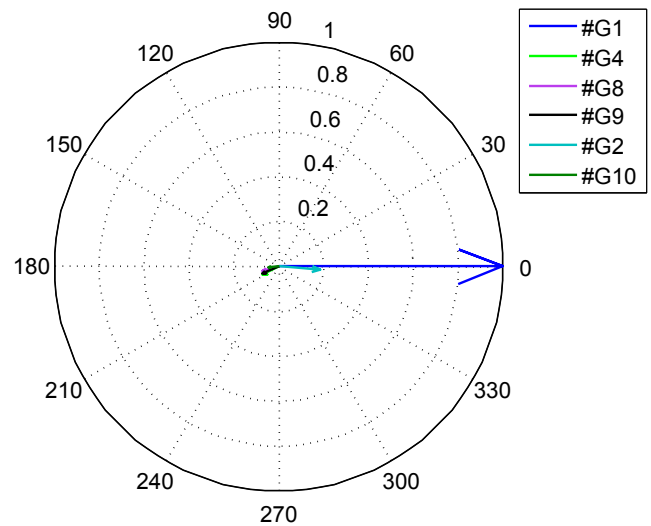


(b) Método CSD

Figura 3.50: Caso 8 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.



(a) Forma modal PacDyn.



(b) Forma modal obtida.

Figura 3.51: Caso 9 - Formas modais de velocidade do Modo 9 (1,1281 Hz).

Caso 10 - Foi aplicado um degrau positivo na potência mecânica do gerador #G4 e um degrau negativo na potência mecânica do gerador #G7.

Caso 11 - Foi aplicado um degrau positivo na potência mecânica do gerador #G1 e um degrau negativo na potência mecânica do gerador #G9.

A formulação dos Casos 10 e 11 tem por objetivo a identificação dos Modos 5 e 9, respectivamente, como definidos na Tabela 3.15.

Nestes dois últimos casos, o invés de perturbar todos os geradores que têm participação relevante no modo de interesse, como feito na subseção anterior, foram aplicadas perturbações apenas nos dois geradores que possuem maiores participações no modo de interesse.

• **Resultados do Caso 10**

A Figura 3.53 mostra a comparação entre as formas modais do PacDyn e dos métodos de densidade espectral, para o modo de 0,9982Hz. A Tabela 3.37 detalha esta informação com os valores coletados. A Figura 3.54 mostra as curvas de velocidades dos geradores com participações significativas neste modo.

Tabela 3.37: Modo 10 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD *versus* PacDyn

Localização	PacDyn		PSD	CSD
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G4	1,0000	0,00	1,0000	0,00
Gerador #G5	0,8512	-3,58	0,6510	-66,26
Gerador #G7	0,8195	174,12	0,9912	-219,51
Gerador #G10	0,6592	176,68	0,2409	-128,23

• **Resultados do Caso 11**

A Figura 3.55 mostra a comparação entre as formas modais do PacDyn e dos métodos de densidade espectral, para o modo de 1,1281Hz. A Tabela 3.8 detalha esta informação com os valores coletados.

Tabela 3.38: Modo 11 - Valores das formas modais obtidos por PSD e CSD *versus* PacDyn

Localização	PacDyn		PSD	CSD
	Módulo	Fase (°)	Módulo	Fase (°)
Gerador #G1	1,0000	0,00	1,0000	0,00
Gerador #G2	0,3792	-16,56	0,1799	-18,77
Gerador #G4	0,2048	151,84	0,0129	-161,84
Gerador #G8	0,2687	210,81	0,2402	-185,36
Gerador #G9	0,2757	214,57	0,1516	-172,00
Gerador #G10	0,2352	177,17	0,0646	-171,75

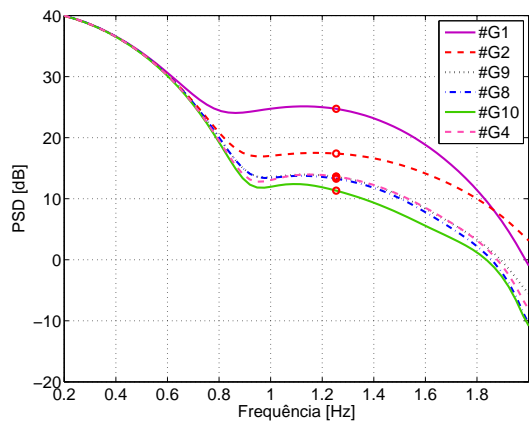
- **Comentários Gerais Acerca do Sistema *New England***

Os resultados para o Sistema *New England* nos Casos 1 a 9 foram satisfatórios no que diz respeito ao módulo e ao ângulo estimados dos vetores escolhidos. Os resultados foram qualitativamente próximos dos resultados do PacDyn, sem apresentar problemas nas normalizações.

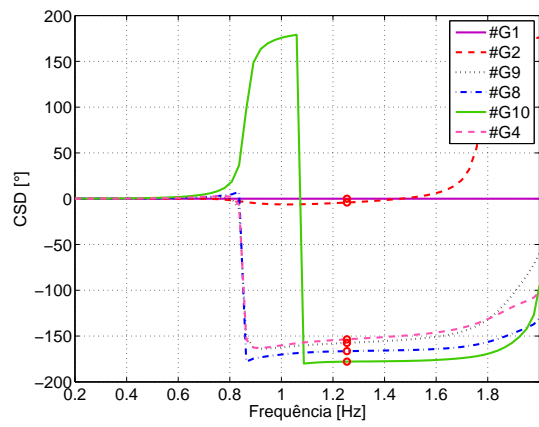
Já os Casos 10 e 11, tiveram resultados um pouco piores do que os casos com degrau na tensão de referência dos geradores.

Embora o Caso 11 apresente diferenças quantitativas quando comparado aos resultados fornecidos pelo PacDyn, pode-se dizer que, qualitativamente, o resultado ainda foi satisfatório.

Já no Caso 10, ainda que o método tenha errado na estimativa das formas modais, os resultados obtidos podem ser justificados observando-se as curvas das velocidades dos geradores, conforme Figura 3.54. Repare que a partir dos 5s de simulação, os geradores #G4, #G5 e #G10 oscilam em fase e contra o gerador #G7. Além disso, as curvas mostram amplitudes nos geradores #G4 e #G5 bem menores (cerca de 1/4) do que as dos geradores #G7 e #G10 em alguns trechos da simulação, sobretudo nos segundos iniciais.

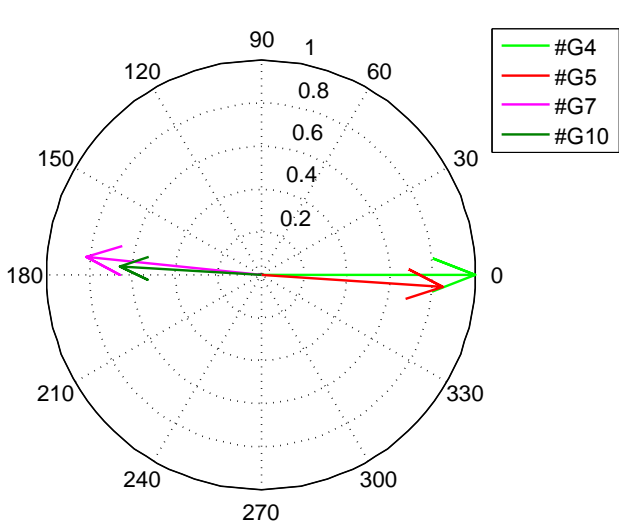


(a) Método PSD

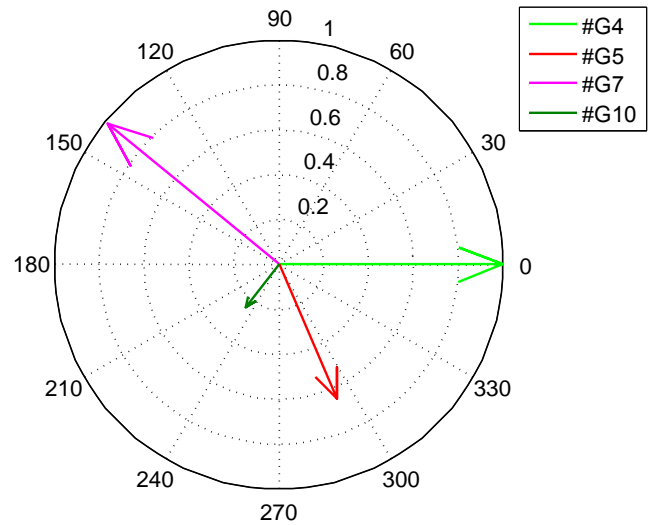


(b) Método CSD

Figura 3.52: Caso 9 - Estimação das formas modais de velocidade via métodos PSD e CSD.



(a) Forma modal PacDyn.



(b) Forma modal obtida.

Figura 3.53: Caso 10 - Formas modais de velocidade do Modo 5 (0,9982 Hz).

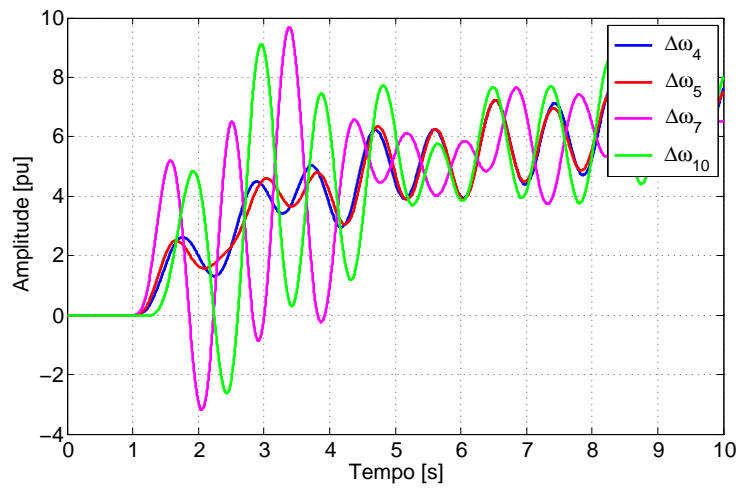


Figura 3.54: Curvas de velocidades dos geradores #G4, #G5, #G7 e #G10.

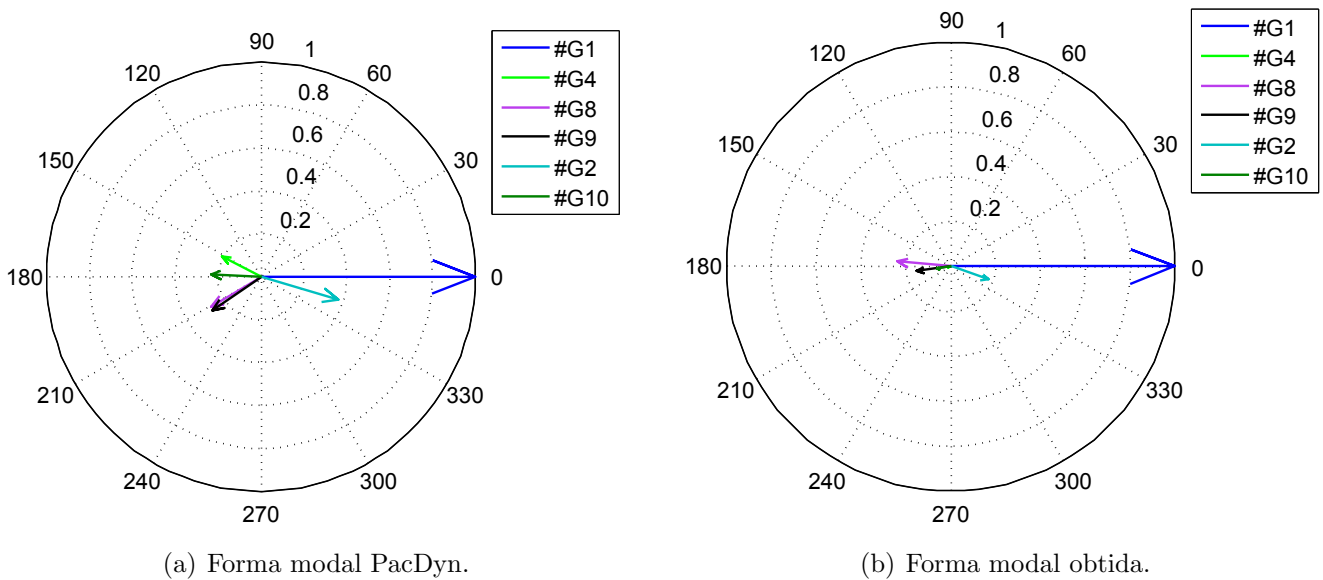


Figura 3.55: Caso 11 - Formas modais de velocidade do Modo 9 (1,1281 Hz).

Capítulo 4

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho explorou técnicas de identificação de sistemas, visando a obtenção de informações modais de sistemas desconhecidos, que não disponibilizem dados de matrizes de estados, e se só tenha acesso aos dados de medição, como por exemplo, dados de ângulo ou de velocidade. No entanto, para se ter conhecimento da confiabilidade dos métodos estudados, foram analisados dados de sistemas cujas propriedades modais eram previamente conhecidas através do programa PacDyn.

Foi apresentado o Método de Prony para aplicações na estimação de modos eletromecânicos e suas respectivas características modais, tais como valores de frequência, amortecimento e formas modais. O Método de Prony é direcionado para análise de dados provenientes de distúrbios *RingDown*, ou seja, distúrbios que provoquem a excitação de um ou mais modos do sistema, gerando oscilações. Neste contexto, foram criados casos categorizados como pequenas ou grandes perturbações. As perturbações com degraus nas tensões de referência ou nas potências mecânicas dos geradores, simuladas no PacDyn, são casos lineares, em que a dimensão do degrau não interfere no sinal de saída. Já perturbações como curto-circuito nas barras do sistema, simuladas no Anatem, são casos não lineares. Nestes casos, ou em casos reais, onde as não linearidades estão presentes, o Método de Prony pode não trazer bons resultados, uma vez que a solução analítica não é uma soma de senóides amortecidas, como no caso linear. Durante o período transitório, a atuação de limitadores e de outros sistemas de proteção pode ocorrer, acarretando um comportamento não

linear.

Os resultados obtidos nas simulações do Método de Prony foram de quatro sistemas multi-máquinas: o Duas Áreas, o *Brazilian Birds*, o Sintético e o *New England*.

No Sistema Duas Áreas, os resultados foram satisfatórios. Entretanto, mesmo nesse simples sistema, as técnicas têm alguma dificuldade de distinguir os dois modos locais, por serem representados por polos muito próximos. Nos testes realizados, a solução para a distinção foi alterar a localização da perturbação. Pôde ser explorada a aplicabilidade do método em sinais com a presença de ruído. O Método de Prony é sensível a ruídos e perde precisão na identificação dos modos quanto menor for a SNR. A solução para estes casos é a utilização de filtros passa-faixas ou passa-baixas, para que sejam eliminadas as frequências que não são de modos eletromecânicos. Também foi analisada a técnica de janelamento, ao aplicar o Método de Prony em apenas parte do sinal a ser analisado, evitando períodos de descontinuidade das curvas. O janelamento melhora a identificação do modo eletromecânico, no que diz respeito à informação de frequência. No entanto, esta técnica piora a estimativa do amortecimento do modo, justamente pelo fato da oscilação poder permanecer por um tempo superior ao da janela. Em relação à ordem do sistema, nos testes realizados, foram arbitrados valores entre 90 e 100. Não foram observadas alterações na identificação, desde que a ordem arbitrada seja superior à ordem real do sistema.

No Sistema *Brazilian Birds* foi realizado um estudo de precisão do Método de Prony, levando em consideração as informações de frequência e amortecimento. Os sinais estudados foram janelados e foram observados bons resultados nas estimações, quando comparados aos valores calculados pelo software PacDyn. Entretanto, houve dificuldades na identificação de modos com frequências muito próximas uma da outra.

O Sistema Sintético foi um sistema didático criado para simular a reconstrução do sinal a partir das estimativas dos coeficientes calculados pelo Método de Prony. O fato de um sistema simples possibilitar a identificação de todos os polos do sistema de uma só vez, permite que o sinal estudado seja reconstituído com facilidade. Além

disso, foram realizados os cálculos das formas modais a partir da matriz de estados \mathbf{A} , que por sua vez foi montada a partir dos coeficientes de Prony. As formas modais foram estimadas, também, com base no cálculo dos resíduos, uma maneira mais apropriada de identificação.

Por fim, visando êxito na identificação dos modos eletromecânicos e de suas formas modais, no Sistema *New England* foram realizadas perturbações direcionadas para excitar os modos previamente conhecidos, por meio do programa PacDyn. Sobre estes sinais foi aplicado o Método de Prony Multissinais, para estimação das formas modais, por meio do cálculo dos resíduos. Os resultados foram satisfatórios em relação aos valores esperados.

Ainda almejando a estimação das formas modais dos modos eletromecânicos, foram apresentados os Métodos PSD e CSD, que são baseados em correlação espectral e também utilizam dados sincronizados. Embora outras pesquisas direcionem a aplicação destes dois métodos sobre Dados Ambiente, este trabalho aplicou as mesmas técnicas utilizando dados provenientes de distúrbios *RingDown*, com casos de pequenas e grandes perturbações no sistema elétrico.

Os resultados obtidos nesses testes baseados em correlação espectral foram de dois sistemas multi-máquinas: o Duas Áreas e o *New England*. No primeiro sistema, embora os resultados tenham apresentado diferenças quantitativas em relação ao esperado, qualitativamente os resultados foram satisfatórios. Além disso, deve-se considerar que métodos de identificação apresentam dificuldades na estimação de modos que possuem frequências ou polos muito próximos uns dos outros. Nos testes realizados, a solução para a distinção foi alterar a localização da perturbação. Já no Sistema *New England*, notou-se a dificuldade das técnicas em distinguir todos os modos eletromecânicos do sistema com um número insuficiente de perturbações e também foi necessário direcionar um distúrbio para que fosse excitado um modo de interesse. Assim, foi possível realizar a identificação dos modos e de suas formas modais.

O estudo dos Métodos de Prony, PSD e CSD permitiu que fossem avaliadas

as vantagens e dificuldades de estimação das propriedades modais quando há insuficiência de observabilidade em sinais medidos, mesmo que sincronizados, auxiliando estudos futuros no que diz respeito à melhoria da tecnologia de sinais sincronizados.

A aplicação prática dos métodos de identificação estudados é permitir a análise modal a partir de dados de medição. Este tipo de análise tem utilidade tanto na complementação de dados analíticos, quanto na comprovação dos resultados por ferramentas analíticas, uma vez que trata-se de uma metodologia livre de erros de modelagem do sistema.

Nos testes realizados foram escolhidas perturbações favoráveis à identificação, para se obter um *RingDown*. Em situações reais, embora não se conheça a perturbação, os modos característicos do sistema são previamente conhecidos, assim como as grandezas que permitem sua observabilidade. Um exemplo disso, é o fato de que a identificação de um modo interárea pode ser facilitada pela análise da diferença angular das tensões nas barras terminais do circuito de interligação dessas áreas.

A sugestão para trabalhos futuros é que sejam realizadas simulações dos métodos estudados em sistemas de grande porte e em sistemas com medições em tempo real, como o Sistema MedFasee.

Referências Bibliográficas

- [1] DE MORAES, R. M., *Sincrofasores em Sistemas de Potência: Aplicações na Estimação de Estado.*, Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense, 2009.
- [2] PRIOSTE, F. B., E SILVA, A. S., DECKER, I. C., “Avaliação de métodos de identificação de modos eletromecânicos em sistemas elétricos de potência.” Em: *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, 2010.
- [3] TASHMAN, Z., KHALILINIA, H., VENKATASUBRAMANIAN, V., “Multi-Dimensional Fourier Ringdown Analysis for Power Systems Using Synchronphasors”, Em: *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 29, pp. 731–741, 2014.
- [4] LIU, G., QUINTERO, J., VENKATASUBRAMANIAN, V. M., “Oscillation Monitoring System Based on Wide Area Synchronphasors in Power Systems”. Em: *IREP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control - VII*, 2007.
- [5] HAUER, J., “Application of Prony Analysis to the Determination of Modal Content and Equivalent Models for Measured Power System Response”, *Transactions on Power Systems*, v. 6, pp. 1062–1068, 1991.
- [6] PRIOSTE, F. B., *Detecção e Controle de Oscilações Eletromecânicas Usando Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada.*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- [7] TRUDNOWSKI, D. J., JOHNSON, J. M., HAUER, J. F., “Making Prony Analysis More Accurate using Multiple Signals”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, pp. 226–231, 1999.
- [8] JEREMIAS, T., *Ambiente de Desenvolvimento de aplicativos para o Processamento de Sincrofasores*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

- [9] TRUDNOWSKI, D. J., “Estimating Electromechanical Mode Shape From Synchrophasor Measurements”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 23, pp. 1188–1195, 2008.
- [10] DOSIEK, L., TRUDNOWSKI, D. J., PIERRE, J. W., “New Algorithms for Mode Shape Estimation Using Measured Data”. Em: *IEEE*, 2008.
- [11] KUNDUR, P., *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Professional: Nova York, EUA, 1994.
- [12] SILVA, R. R., *Análise Dinâmica Frente a Pequenas e Grandes Perturbações do Sistema Elétrico Acre-Rondônia.*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [13] VANCUTSEM, T., VOURNAS., C., *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Norwell, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [14] OGATA, K., *Engenharia de Controle Moderno*. LTC - Livros Tecnicos e Científicos Editora S.A., 1998.
- [15] HAUER, J., DEMEURE, C., SCHARF, L., “Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 5, pp. 80–89, 1990.
- [16] MARPLE, S. L., *Digital Spectral Analysis with Applications*. Prentice Hall, 1987.
- [17] BENETTI, M. A., *Aplicação de Dados de Medição Fasorial Sincronizada na Supervisão e no Controle de Sistemas de Energia Elétrica: Avaliação Automática da Segurança Dinâmica.*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- [18] CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, *Programa PacDyn - Análise de Pequenos Sinais em Sistemas de Potência - Manual do Usuário - Versão 9.4*, 2011.
- [19] CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, *Programa ANATEM - Análise de Transitórios Eletromecânicos - Manual do Usuário - V10.04.05*, 2010.
- [20] *Matlab R2010a - The Language of Technical Computing*, 2010.
- [21] SANTOS, M. M., *Análise da Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência usando dados de Medição Fasorial Sincronizada.*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

- [22] SARMADI, S. A. N., VENKATASUBRAMANIAN, M. V., “Different Classes of Oscillation Monitoring systems: Advantages and Disadvantages”. Em: *School of Electrical Engineering and Computer Science Washington State University Pullman, WA 99163*.
- [23] CARNEIRO, W. A., *Avaliação do comportamento dinâmico de turbinas a gás aeroderivativas na operação em ciclo combinado.*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2007.
- [24] VALENTINI, T. M., ASSIS, T. M. L., “Exploração de Técnicas de Análise de Estabilidade a Pequenos Sinais em Sistemas de Potência.” Em: *Anais do XXI SNPTEE*, 2011.