

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EDUARDO ZIBETTI DOS PASSOS

PROPOSTA DE DIAGRAMA DE ESTABILIZAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE DINÂMICAS
OSCILATÓRIAS ELETROMECÂNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

CURITIBA

2020

EDUARDO ZIBETTI DOS PASSOS

PROPOSTA DE DIAGRAMA DE ESTABILIZAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE DINÂMICAS
OSCILATÓRIAS ELETROMECÂNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Roman Kuiava

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira

CURITIBA

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

P289p

Passos, Eduardo Zibetti dos

Proposta de diagrama de estabilização para identificação de dinâmicas oscilatórias eletromecânicas em sistemas elétricos de potência [recurso eletrônico]/ Eduardo Zibetti dos Passos - Curitiba, 2020.

Dissertação (Mestrado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Roman Kuiava

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira

1. Modos eletromecânicos. 2. Rede de distribuição. 3. Tecnologia educacional. I. Kuiava, Roman. II. Oliveira, Gustavo Henrique da Costa. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná. CDD 621.3

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
ELÉTRICA - 40001016043P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **EDUARDO ZIBETTI DOS PASSOS** intitulada: **Proposta de diagrama de estabilização para identificação de dinâmicas oscilatórias eletromecânicas em sistemas elétricos de potência**

, sob orientação do Prof. Dr. ROMAN KUIAVA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 15 de Dezembro de 2020.



ROMAN KUIAVA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



RICARDO SCHUMACHER

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



TATIANE CRISTINA DA COSTA FERNANDES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais, Maria Inês Zibetti dos Passos e Roberto dos Passos pelo amor e apoio incondicional. Minha namorada Maria Thereza de Oliveira Torres pelo suporte emocional nos momentos de dificuldade. Agradeço também aos professores Roman Kuiava e Gustavo Henrique da Costa Oliveira, além do colega Yuri Poledna, que participaram desta jornada, todos sempre solícitos, porque sem eles eu não teria conseguido chegar até aqui. Agradeço ainda ao apoio financeiro obtido pela bolsa de mestrado do projeto financiado pelo programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico da Companhia Paranaense de Energia – COPEL, através do projeto PD 2866-0470/2017, regulado pela ANEEL.

*“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências.
O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso
passará pela vida sem ver nada.”
Albert Einstein*

RESUMO

A transição de redes distribuição passivas, para redes ativas, devido a presença de GD, tem mudado o comportamento dinâmico destas redes frente a incidência de perturbações. Por exemplo, questões relacionadas a estabilidade do ângulo do rotor, como é o caso das oscilações eletromecânicas de baixa frequência, antes restritas a sistemas de G&T, podem afetar também redes de distribuição a medida que aumenta o número de geradores síncronos conectados diretamente a redes de distribuição. Uma abordagem para o estudo das oscilações eletromecânicas de baixa frequência é a utilização de métodos de decomposição modal que processam medições fasoriais sincronizadas no tempo, coleta da rede por PMU. Todavia, uma das dificuldades na utilização desses métodos está no aparecimento de modos espúrios dentre o conjunto de modos estimados. Os modos espúrios estão presentes na representação matemática do modelo estimado, mas não apresentam significado físico no sistema. Este trabalho tem como objetivo propor uma adaptação da técnica denominada diagrama de estabilização, a qual é bastante utilizada na classificação de modos oscilatórios em sistemas mecânicos, para a identificação de modos eletromecânicos em detrimento dos modos espúrios para um SEP. O processo de estimação modal para operação ambiente do sistema é realizado pelos métodos N4SID e YW, tendo a técnica diagrama de estabilização proposta a tarefa de classificar os modos que apresentam significado físico no sistema. Os estudos para a validação dos métodos são realizados em dois sistemas testes implementados em ambiente computacional. O primeiro uma rede de distribuição real de 32 barras localizada no interior de São Paulo, e o segundo uma rede de distribuição de 37 barras com presença de diferentes tecnologias de GD. Três cenários de análise são propostos, o primeiro analisa o efeito da aleatoriedade das carga no processo de estimação modal, o segundo o efeito do ruído no sinal de medição e o terceiro o efeito da aleatoriedade da carga e do ruído de medição juntos. Por último, dados reais coletados de μ PMU instalados na rede de distribuição localizada no campus da UFPR são utilizados no processo de estimação modal junto com a técnica de diagrama de estabilização proposta. Os resultados obtidos demonstram que a técnica de diagrama de estabilização foi capaz de identificar os modos eletromecânicos dominantes em ambos os sistemas testes. Pode-se concluir que a técnica de diagrama de estabilização proposta é uma ferramenta válida na classificação de modos eletromecânicos e traz uma análise gráfica fácil e intuitiva para o operador dos modos eletromecânicos presentes no sistema.

Palavras-chaves: Modos eletromecânicos. Rede de distribuição. N4SID. Yule Walker(YW). Diagrama de estabilização.

ABSTRACT

The transition from passive distribution networks to active networks, due to the presence of distributed generation, has changed the dynamic behaviour of these networks in view of the incidence of disturbances. For example, issues related to rotor angle stability, such as low frequency electromechanical oscillations, previously restricted to generation and transmission systems, can also affect distribution networks as the number of synchronous generators connected directly to distribution networks increase. An approach to the study of low frequency electromechanical oscillations is the use of modal decomposition methods that process time-synchronized phasor measurements collected from the network by PMU. However, one of the difficulties in using these methods is the estimation of spurious modes among the set of estimated modes. Spurious modes are present in the mathematical representation of the estimated model, but have no physical meaning in the system. This work aims to propose an adaptation for electrical power systems of the stabilisation diagram technique (widely used in the classification of oscillatory modes in mechanical systems) for the identification of electromechanical modes to the detriment of spurious modes. The process of modal estimation for the ambient operation of the system is carried out by the methods N4SID and YW, with the proposed stabilisation diagram technique the task of classifying the modes that present physical meaning in the system. The studies for the validation of the methods are carried out in two test systems implemented in a computational environment. The first is a real distribution network of 32 buses located in the state of São Paulo, and the second is a distribution network of 37 buses with the presence of different technologies of distributed generation. Three analysis scenarios are proposed, the first analyses the effect of load randomness on the modal estimation process, the second the effect of noise on the measurement signal and the third the effect of load randomness and measurement noise together. Finally, real data collected from μ PMU installed in the distribution network located on the UFPR campus are used in the modal estimation process along with the proposed stabilisation diagram technique. The results obtained demonstrate that the stabilisation diagram technique was able to identify the dominant electromechanical modes in both test systems. It can be concluded that the proposed stabilisation diagram technique is a valid tool in the classification of electromechanical modes and brings an easy and intuitive graphic analysis to the electromechanical modes present in the system.

Key-words: Electromechanical modes. Distribution networks. N4SID. Yule Walker (YW). Stabilization Diagram.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Classificação de estabilidade de sistemas elétricos de potência	27
FIGURA 2 – Classificação dos métodos de decomposição modal	36
FIGURA 3 – Fluxograma do processo de estimação modal	39
FIGURA 4 – Fluxograma Proposta de Diagrama de estabilização	47
FIGURA 5 – Diagrama de estabilização Convencional	48
FIGURA 6 – Diagrama de estabilização 3D	50
FIGURA 7 – Diagrama de estabilização 2D	51
FIGURA 8 – Diagrama unifilar da rede de distribuição localizada no interior do Estado de São Paulo. Sistema teste 1	54
FIGURA 9 – Sinal de frequência da barra 602	57
FIGURA 10 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 20 minuto de janela de dados.	60
FIGURA 11 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 20 minuto de janela de dados.	61
FIGURA 12 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 10 minuto de janela de dados.	61
FIGURA 13 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 10 minuto de janela de dados.	62
FIGURA 14 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 5 minuto de janela de dados.	62
FIGURA 15 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 5 minuto de janela de dados.	63
FIGURA 16 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 20 minuto de janela de dados.	64
FIGURA 17 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 20 minuto de janela de dados.	65
FIGURA 18 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 10 minuto de janela de dados.	66
FIGURA 19 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 10 minuto de janela de dados.	66
FIGURA 20 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 5 minuto de janela de dados.	67
FIGURA 21 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 5 minuto de janela de dados.	67

FIGURA 22 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 20 minuto de janela de dados.	69
FIGURA 23 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 20 minuto de janela de dados.	70
FIGURA 24 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 10 minuto de janela de dados.	70
FIGURA 25 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 10 minuto de janela de dados.	71
FIGURA 26 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 5 minuto de janela de dados.	72
FIGURA 27 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 5 minuto de janela de dados.	72
FIGURA 28 – Diagrama unifilar da rede de distribuição do sistema teste 2	74
FIGURA 29 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 20 minuto de janela de dados.	79
FIGURA 30 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 20 minuto de janela de dados.	80
FIGURA 31 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 10 minuto de janela de dados.	81
FIGURA 32 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 10 minuto de janela de dados.	81
FIGURA 33 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 5 minuto de janela de dados.	82
FIGURA 34 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 5 minuto de janela de dados.	82
FIGURA 35 – Diagrama unifilar com a localização das μ PMU	84
FIGURA 36 – Localização das μ PMU no estado do Paraná	85
FIGURA 37 – Método YW com ordem máxima 25, data da amostra 30/09/2020 as 17:20	86
FIGURA 38 – Método N4SID com ordem máxima 20, data da amostra 30/09/2020 as 17:20	87
FIGURA 39 – Método YW com ordem máxima 25, data da amostra 05/05/2020 as 18:00	88
FIGURA 40 – Método N4SID com ordem máxima 20, data da amostra 05/05/2020 as 18:00	89
FIGURA 41 – Método YW com ordem máxima 20, data da amostra 30/09/2020 as 17:00	90
FIGURA 42 – Método N4SID com ordem máxima 20, data da amostra 30/09/2020 as 17:00	90
FIGURA 43 – Gerador Síncrono de rotor liso	100
FIGURA 44 – Modelo do regulador de velocidade	101
FIGURA 45 – Modelo do regulador de tensão	102

FIGURA 46 – Modelo de máquina síncrona de polos salientes	103
FIGURA 47 – Variação da potência ativa da barra 12, sistema teste 2, com sementes iniciais diferentes	108
FIGURA 48 – Variação da frequência da barra 12, sistema teste 2, com sementes iniciais diferentes	108
FIGURA 49 – Método YW, frequência de corte do filtro 8Hz.	109
FIGURA 50 – Método YW, frequência de corte do filtro 8,5Hz	110
FIGURA 51 – Método YW, frequência de corte do filtro 7,5Hz	110
FIGURA 52 – Método YW, frequência de corte do filtro 7Hz	110
FIGURA 53 – Método YW, frequência de corte do filtro 6,5Hz	110
FIGURA 54 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 15 minuto de janela de dados.	112
FIGURA 55 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 15 minuto de janela de dados.	112
FIGURA 56 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 1 minuto de janela de dados.	113
FIGURA 57 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 1 minuto de janela de dados.	113
FIGURA 58 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 15 minuto de janela de dados.	114
FIGURA 59 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 15 minuto de janela de dados.	114
FIGURA 60 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 1 minuto de janela de dados.	114
FIGURA 61 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 1 minuto de janela de dados.	115
FIGURA 62 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 15 minuto de janela de dados.	115
FIGURA 63 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 15 minuto de janela de dados.	115
FIGURA 64 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 1 minuto de janela de dados.	116
FIGURA 65 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 1 minuto de janela de dados.	116
FIGURA 66 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 20 minuto de janela de dados.	117

FIGURA 67 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 20 minuto de janela de dados.	118
FIGURA 68 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 15 minuto de janela de dados.	118
FIGURA 69 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 15 minuto de janela de dados.	119
FIGURA 70 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 10 minuto de janela de dados.	119
FIGURA 71 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 10 minuto de janela de dados.	119
FIGURA 72 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 5 minuto de janela de dados.	120
FIGURA 73 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 5 minuto de janela de dados.	120
FIGURA 74 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 1 minuto de janela de dados.	120
FIGURA 75 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 1 minuto de janela de dados.	121
FIGURA 76 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 20 minuto de janela de dados.	121
FIGURA 77 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 20 minuto de janela de dados.	122
FIGURA 78 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 15 minuto de janela de dados.	122
FIGURA 79 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 15 minuto de janela de dados.	123
FIGURA 80 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 10 minuto de janela de dados.	123
FIGURA 81 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 10 minuto de janela de dados.	123
FIGURA 82 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 5 minuto de janela de dados.	124
FIGURA 83 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 5 minuto de janela de dados.	124
FIGURA 84 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 1 minuto de janela de dados.	124
FIGURA 85 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 1 minuto de janela de dados.	124

FIGURA 86 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 15 minuto de janela de dados.	125
FIGURA 87 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 15 minuto de janela de dados.	125
FIGURA 88 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 1 minuto de janela de dados.	125
FIGURA 89 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 1 minuto de janela de dados.	126

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Dados de barra sistema teste 1	55
TABELA 2 – Dados de linha sistema teste 1	56
TABELA 3 – Dados de linha sistema teste 1	56
TABELA 4 – Modos eletromecânicos via modelo conceitual sistema teste 1.	58
TABELA 5 – Dados de barra e condição operativa do sistema teste 2	75
TABELA 6 – Dados das linhas e transformadores do sistema teste 2	76
TABELA 7 – Modos eletromecânicos via modelo conceitual sistema teste 2	77
TABELA 8 – Modos eletromecânicos do sistema interligado nacional	85
TABELA 9 – constantes de tempo	100
TABELA 10 – Gerador Síncrono de polos lisos	101
TABELA 11 – Parâmetros regulador de velocidade	101
TABELA 12 – regulador de tensão	102
TABELA 13 – Constantes de tempo do gerador síncrono sistema teste 2	103
TABELA 14 – Parâmetros síncronos de polos salientes Sistema teste 2	104
TABELA 15 – Parâmetros do gerador de indução com dupla alimentação sistema teste 2	104
TABELA 16 – Motores de indução sistema teste 2	105

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

COMMP	Central de Operação e Monitoramento da Minirrede do Politécnico
CVA	<i>Canonical variate analysis</i>
Copel	Compania Paranaense de Energia
DELT	Departamento de Engenharia Elétrica
ESP	Estabilizadores de sistemas de potência
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
G&T	Geração e Transmissão
GD	Geração Distribuída
GPA	Grid Protection Alliance
GPS	<i>Global Position Systems</i>
LABGD	Laboratório de Geração Distribuída
MFS	<i>Medição Fasorial Sincronizada</i>
N4SID	<i>Numerical Algorithm for SubSpace State Space System Identification</i>
PC	<i>Principal component</i>
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PDC	<i>Phasor Data Concentrator</i>
PDF	Probability Density Function
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
PSL	Power Standards Labs
PSS	<i>Power systems stabilizers</i>
R3LS	<i>Robust Recursive Regularized Least Squares</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
UFPR	Universidade Federal do Paraná

VF	<i>Vector Fitting</i>
WAMS	<i>Wide Area Monitoring System</i>
YW	<i>Yule Walker</i>
YWS	<i>Yule Walker-Spectrum</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos	24
1.1.1	Objetivo Principal	24
1.1.2	Objetivos específicos	24
1.2	Estrutura da Dissertação	25
2	OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	26
2.1	Estabilidade em sistemas de potência	26
2.2	Estabilidade do ângulo do rotor sob pequenas perturbações	27
2.3	Oscilações eletromecânicas em redes de distribuição com geração distribuída	28
2.4	Abordagens matemáticas para análise das oscilações eletromecânicas de baixa frequência	30
2.4.1	Modelo Conceitual	30
2.4.2	Métodos de decomposição modal	34
2.4.2.1	μ PMU's	34
2.4.2.2	Classificação dos métodos de decomposição modal	35
3	METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE MODOS ELETROMECAÑICOS	39
3.1	Etapa de pré-processamento	39
3.2	Etapa de processamento	40
3.2.1	<i>N4SID</i>	41
3.2.2	Método <i>Yule Walker</i>	43
3.3	Etapa de pós-processamento	45
3.3.1	Diagrama de Estabilização Convencional	47
3.3.2	Diagrama de Estabilização 3D	49
3.3.3	Diagrama de Estabilização 2D	51
4	TESTES E RESULTADOS	53
4.1	Sistema teste 1	53
4.1.1	Dados do sistema teste: parâmetros de linha e condição operativa	55
4.1.2	Simulação da operação ambiente	56
4.1.3	Análise linearizada via Pacdyn	57
4.1.4	Resultados	58
4.1.4.1	Cenário 1	59
4.1.4.2	Cenário 2	63
4.1.4.3	Cenário 3	68
4.1.4.4	Conclusões obtidas para o sistema teste 1	72
4.2	Sistema teste 2	73
4.2.1	Determinação do ponto de operação	74

		17
4.2.2	Simulação da operação ambiente	77
4.2.3	Análise linearizada via Pacdyn	77
4.2.4	Resultados	78
4.2.4.1	Cenário 3	78
4.2.4.2	Conclusões obtidas para o sistema teste 2	82
4.3	Processamento de dados de μ PMU localizadas na UFPR	83
4.3.1	Resultados obtidos para μ PMU localizada no DELT	86
4.3.2	Resultados obtidos para μ PMU localizada na cidade de Palotina-Pr	88
	Conclusão	91
	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICES	99
APÊNDICE 1	MODELOS DINÂMICOS DOS GERADORES E MALHAS DE CONTROLE - SISTEMA TESTE 1	100
1.1	Modelo Dinâmico do Gerador	100
1.2	Regulador de Velocidade	100
1.3	Regulador de Tensão	102
APÊNDICE 2	MODELOS DINÂMICOS DOS GERADORES E MOTORES DE INDUÇÃO - SISTEMA TESTE 2	103
2.1	Modelo Dinâmico do Gerador	103
2.2	Modelo gerador Eólico	103
2.3	Motores de indução	103
APÊNDICE 3	GERADOR DE NÚMEROS PSEUDO ALEATÓRIOS	106
APÊNDICE 4	ANÁLISE DO PROCESSO DE FILTRAGEM COM MODOS ESPÚRIOS	109
APÊNDICE 5	DEMAIS RESULTADOS DO SISTEMA TESTE 1	112
APÊNDICE 6	DEMAIS RESULTADOS DO SISTEMA TESTE 2	117
6.1	Cenário 1	117
6.2	Cenário 2	121
6.3	Cenário 3	123

1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente por energia elétrica implica na necessidade de constante ampliação e evolução da operação dos SEP. Formados principalmente por unidades geradoras, linhas de transmissão e redes de distribuição, os primeiros SEP operavam de forma isolada e foram sendo interligados a partir de meados do século XX, assim favorecendo o intercâmbio de energia entre as diferentes regiões interconectadas e tornando os SEP mais robustos e complexos em sua operação.

Nesse primeiro momento, o fluxo de potência nas redes de distribuição apresentava apenas uma direção, suprindo as cargas do sistema. Atualmente, no entanto, a evolução dos SEP tem mudado esse cenário, em que questões técnicas, econômicas e ambientais possibilitaram a conexão de unidades geradoras diretamente nas redes de distribuição, essas conhecidas como GD, podendo essas redes em alguns casos gerar mais energia do que seu consumo, invertendo o fluxo de potência usual, transformando essas redes passivas em redes ativas de distribuição (PATAÇA, 2015).

Dessa forma, os estudos de estabilidade necessitam ser constantemente avaliados para acompanhar as mudanças que ocorrem nos SEP. A presença de GD em redes de distribuição exemplifica umas dessas mudanças que estão ocorrendo nos SEP e que precisam ser melhor avaliadas.

Os estudos de estabilidade de SEP buscam avaliar a capacidade do mesmo, dada uma condição inicial de operação de encontrar um ponto de equilíbrio após estar sujeito a uma perturbação, com a maiorias de suas variáveis dentro de certos limites operativos e a maior parte do sistema intacto (KUNDUR, 1994) (ROGERS, 2000) (KUNDUR P, 2004). Para tanto, são classificados como problemas de estabilidade de tensão, estabilidade de frequência e estabilidade do ângulo do rotor, sendo que para cada caso são feitas considerações para simplificar a análise de cada fenômeno.

A estabilidade de tensão está relacionada à capacidade do sistema de potência de manter a tensão das barras do sistema após ser submetido a uma perturbação, para tanto o sistema deve ser capaz de manter ou restabelecer o equilíbrio entre a demanda das cargas e o fornecimento de potência a essas cargas. Quando o sistema não consegue manter esse equilíbrio, a instabilidade de tensão se apresenta como uma queda ou aumento progressivo do nível de tensão em algumas barras (KUNDUR, 1994)(ROGERS, 2000)(KUNDUR P, 2004).

A estabilidade de frequência, por sua vez, é vinculada a capacidade do sistema de manter a frequência estável após uma grande perturbação, resultado de um desequilíbrio significativo entre a geração e as cargas do sistema. Ela está relacionada a capacidade do sistema de manter ou restabelecer o equilíbrio entre geração e carga com o mínimo de desconexão de

cargas. A instabilidade de frequência se apresenta como o aumento ou a diminuição progressiva da frequência do sistema, levando perda de unidades geradoras e de cargas (KUNDUR, 1994) (ROGERS, 2000) (KUNDUR P, 2004).

Já a estabilidade do ângulo do rotor está relacionada com a capacidade do sistema de manter o sincronismo dos geradores em um SEP interconectado após a ocorrência de uma perturbação, sendo relacionada com a capacidade do sistema de manter ou restabelecer o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque mecânico de cada uma das máquinas síncronas presentes no sistema. A instabilidade do ângulo do rotor se manifesta como um aumento da amplitude das oscilações do ângulo do rotor que levam a perda de sincronismos dos geradores, resultado da incidência de uma grande ou pequena perturbação (KUNDUR, 1994) (ROGERS, 2000) (KUNDUR P, 2004).

Em relação a incidência de pequenas perturbações, como flutuações de carga, elas estimulam o aparecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência, que podem ser vistas como uma composição de diferentes dinâmicas de natureza oscilatória, caracterizadas principalmente por uma frequência e amortecimento, denominados de modos de oscilação ou modos eletromecânicos.

As pequenas perturbações que estimulam as oscilações eletromecânicas podem ser classificadas ainda como pequenos transientes, que resultam em uma resposta transitória do sistema, relacionada por exemplo a um curto-circuito de pequena intensidade, podendo-se realizar a análise por meio de uma abordagem linearizada para a representação matemática do sistema. Ou ainda, podemos considerar as variações de carga que ocorrem naturalmente nos SEP como as pequenas perturbações do sistema, que resultam em uma resposta ambiente do sistema. As variações de carga acontecem de forma contínua e aleatória nos SEP, sendo a resposta ambiente do sistema continuamente estimulada, assim, as oscilações eletromecânicas se apresentam como um fenômeno inerente a SEP (KUNDUR, 1994) (ROGERS, 2000) (KUNDUR P, 2004).

Tradicionalmente, tanto para sistemas de GET quanto para redes de distribuição com GD, a análise das oscilações eletromecânicas é realizada através do modelo conceitual do sistema (KUNDUR, 1994). Esse modelo, com representação na forma de espaço de estados, é formado por um conjunto de equações diferenciais que regem o comportamento físico dos componentes do sistema. Considerando a análise do comportamento dinâmico do sistema frente a pequenas perturbações, esse modelo pode ser linearizado em torno de um ponto de operação específico. Os modos eletromecânicos são então obtidos através do cálculo dos autovalores da matriz de estado do sistema conceitual linearizado. Ainda, pelo cálculo dos autovetores associados a estes autovalores é possível estudar o comportamento dinâmico dos modos eletromecânicos, identificando quais se apresentam como modos locais e interárea, em se tratando de sistemas de GET, e modos globais quando relacionados a redes de distribuição com GD (KUIAVA et al., 2008).

Em se tratando de dinâmicas de natureza eletromecânica estimuladas por pequenas perturbações em sistemas de GET, os modos eletromecânicos de maior interesse são aqueles de baixa frequência, situadas entre 0,1Hz e 3 Hz. Tais modos podem ser classificados entre modos locais, onde geradores de uma mesma região geográfica oscilam entre si em frequências entre 1 Hz e 3Hz, e modos interárea, que por sua vez, apresentam frequências menores, entre 0,1Hz e 2 Hz, e com comportamento oscilatório entre geradores de diferentes regiões geográficas, geralmente conectadas por longas linhas de transmissão, (ROGERS, 2000). Em redes de distribuição com GD os modos eletromecânicos de baixa frequência podem ainda ser classificados como modos globais, quando a maioria ou todos os geradores síncronos presentes em determinada rede de distribuição oscilação contra o restante do sistema. Esses modos globais podem apresentar frequência mais elevada dos presentes em sistemas de GET, com sua faixa de ocorrência podendo chegar a 6Hz (KUIAVA et al., 2008).

Porém, a necessidade de se conhecer o estado topológico da rede, das cargas e de todos os elementos em operação (incluindo geradores, transformadores, reguladores de tensão, dentre outros), torna praticamente inviável a análise em tempo real dos modos eletromecânicos via modelo conceitual, principalmente em redes de distribuição com uma topologia mais ramificada, e suscetíveis a uma maior variação de carga e topologia da operação (LEANDRO et al., 2015). O uso de modelos conceituais se torna mais plausível, portanto, no contexto de problemas de planejamento de sistemas de potência, do que para problemas de operação em tempo real.

Uma abordagem alternativa, mais adequada ao monitoramento destes modos eletromecânicos em tempo *quase real*¹, é estimá-los a partir de métodos de decomposição modal utilizando sinais sincronizados por GPS coletados de unidades de MFS (também conhecidos por PMU) (PHADKE, 2002). Em sistemas de GET essa abordagem já vem sendo utilizada em diversos países. Aqui no Brasil como exemplo, existe o projeto MedFasee (de origem na Universidade Federal de Santa Catarina), que possui 28 PMU instaladas em diferentes universidades, incluindo a própria UFPR, cobrindo as cinco regiões geográficas do Brasil (DECKER et al., 2011).

Os métodos de decomposição modal desenvolvidos para identificar modos eletromecânicos estimulados por pequenas perturbações (operação ambiente) utilizam técnicas de sistemas lineares para obter estimativas dos modos eletromecânicos a partir de sinais amostrados de PMU. Em sistemas de GET, estes métodos são capazes de estimar com maior qualidade os modos eletromecânicos dominantes presentes no sistemas, esses assim chamados por apresentarem uma maior energia cinética nas oscilações dos ângulos dos rotores dentre os modos presentes, geralmente modos interáreas. Já em redes de distribuição com GD os modos globais apresentam maior observabilidade nos sinais amostrados e geralmente são estimados com maior precisão em relação aos demais modos presentes no sistema (KUIAVA R RAMOS, 2017).

¹ Utiliza-se o termo *quase real* devido a existência de atrasos de tempo na disponibilização dos sinais de campo, assim como, no próprio processamento destes sinais.

Esses métodos de decomposição modal são classificados em duas categorias principais (THAMBIRAJAH, 2010): *Ringdown Analysis*, cujos métodos se baseiam na análise dos primeiros ciclos de uma resposta transitória do sistema, quando sujeito a uma grande perturbação e; *Mode-Meter Algorithms* que fazem o processamento de dados ambientes do sistema, onde buscando-se estimar os modos eletromecânicos estimulados apenas pelas variações de carga da rede e por outras pequenas perturbações que podem ocorrer durante o regime normal de operação. Os métodos *Mode-Meters* podem ser classificados entre métodos paramétricos e não paramétricos, sendo que os paramétricos podem ser formulados de forma recursiva ou por processamento de blocos (não recursiva).

Vale ressaltar que os problemas relacionados a estabilidade do ângulo do rotor foram primeiramente estudados para sistemas de GET, devido a presença da grande maioria dos geradores síncronos do sistema, enquanto que a rede de distribuição era predominantemente passiva (TRUDNOWSKI, 2008) (TRUDNOWSKI; PIERRE, 2009). Porém, atualmente, a presença de GD (principalmente geradores síncronos) em redes de distribuição, está mudando esse cenário (EDWARDS et al., 2000) (KUIAVA et al., 2008)(SALIM et al., 2011)(FERNANDES et al., 2017). Redes de distribuição com presença de GD também podem apresentar problemas de oscilações eletromecânicas de baixa frequência. O estudo de (KUIAVA et al., 2008), por exemplo, utiliza um modelo de uma rede de distribuição real localizada no estado de São Paulo, para corroborar com a tese de que apenas uma pequena quantidade de geradores pode deteriorar os amortecimentos dos modos eletromecânicos presentes.

Estudos apontam ainda que algumas características das rede de distribuição podem influenciar nas dinâmicas desses modos eletromecânicos. Por exemplo, a presença de geradores de menor porte, com potência e inércia menores quando comparados aos geradores presentes em sistemas de GET. Além disso, redes de distribuição apresentam uma topologia predominantemente radial e com condutores com resistência maior que linhas de transmissão de alta tensão. Esses fatores, somados a tendência de crescimento do número de unidades de GD apontam para uma deterioração das taxas de amortecimento dos modos eletromecânicos presentes nessas redes de distribuição (KUIAVA et al., 2008), (SALIM et al., 2011), (FERNANDES et al., 2017).

Com isso, a análise das oscilações eletromecânicas em redes de distribuição com GD tem se tornado um assunto mais recorrente na literatura, mas que, ainda se faz necessária uma análise mais detalhada das técnicas de estimação modal já utilizadas em sistemas de GET, em redes de distribuição com GD (FERNANDES et al., 2017) (KONTIS et al., 2018).

Nesse contexto, (KONTIS et al., 2018) analisa a performance de oito métodos baseados em *Ringdown Analysis*, consagrados em sistemas de GET, para estimar a resposta transitória de um modelo de rede de distribuição com grande penetração de GD, e com capacidade de operação de modo ilhado. O modelo de rede de distribuição proposto ainda apresenta diferentes tecnologias de GD em quase todos os seus alimentadores, além da presença de cargas estáticas e dinâmicas.

Já (SALIM et al., 2011) traz o debate da operação desbalanceada em redes de distribuição, muito mais relevante do que em sistemas de GET pela proximidade com as cargas da rede. Em (FERNANDES et al., 2017), o ruído presente na rede desbalanceada é considerado para analisar a performance do método *ringdown* Prony.

No entanto, uma das limitações na utilização dos métodos de decomposição modal, tanto em sistemas de GET quanto em redes de distribuição com GD, está no aparecimento de modos espúrios entre o conjunto de modos estimados. Esses modos são assim chamados por estarem presentes na representação matemática do modelo estimado, porém, não tem significado físico. Esses modos espúrios podem estar relacionados a escolha de modelos com ordem elevada (geralmente um valor bem superior ao número de modos eletromecânicos presentes no sinal), estratégia utilizada para melhorar o condicionamento numérico desses métodos, mas que acarreta o surgimento de modos espúrios.

Assim, uma tarefa tão importante quanto uma boa estimativa dos modos oscilatórios de baixa frequência está em identificar quais são modos físicos presentes no sistema (e, portanto, eletromecânicos) e quais são modos espúrios. Além do mais, este problema é ainda mais relevante em redes de distribuição com GD, pois, para estes sistemas, o modo eletromecânico global pode não ser tão predominante em relação aos demais modos oscilatórios, o que pode dificultar ainda mais a eliminação dos modos espúrios.

Algumas técnicas tem sido utilizadas em SEP na identificação dos modos físicos, como a energia dos modos de oscilação (TRUDNOWSKI, 2008) e o índice de dominância modal (LEANDRO et al., 2015), mas esse ainda é um problema à ser melhor trabalhado, pois como aponta (LEANDRO et al., 2015), na presença de vários modos com alta energia as técnicas acima apresentam dificuldade na classificação dos modos eletromecânicos. Uma outra abordagem para esse problema é a técnica de diagrama de estabilização, utilizada nesse trabalho e ainda pouco empregada em SEP (JINGMIN et al., 2011).

A ideia principal dos diagramas de estabilização, está na premissa de que os modos físicos são pouco sensíveis à variação da ordem do modelo identificado no processo de estimação modal ². Tais diagramas foram inicialmente propostos para estudos em estruturas mecânicas e acústicas, como é o caso de (AUWERAER; PEETERS, 2004), que utiliza a técnica de diagrama de estabilização para selecionar os modos oscilatórios físicos de modelos de estruturas dinâmicas e vibrações acústicas. Em outro exemplo, (MRABET et al., 2014) utiliza o diagrama de estabilização junto com um método de identificação de subespaços estocásticos para identificar os modos oscilatórios presentes em estruturas de aeronaves. Nesses sistemas o foco está em identificar as frequências dos modos oscilatórios presentes, pois em estruturas mecânicas esses modos oscilatórios são em grande maioria bem amortecidos. Porém, em SEP, o amortecimento

² Nota-se que o termo estabilização presente na técnica de diagrama de estabilização refere-se aos modos que se apresentam estáveis, com pouca diferença na frequência e amortecimento, com relação a modelos de diferentes ordens, e não no sentido relacionado à estabilidade do sistema.

dos modos eletromecânicos é de grande importância, sendo utilizado como um indicador da estabilidade do sistema.

Destaca-se ainda, (PHILLIPS; ALLEMANG, 2008) que trata em seu artigo especificamente dos diagramas de estabilização ou diagrama de consistência, como o autor também o chama, apresentando diferentes metodologias para a construção e apresentação destes diagramas. Quanto a aplicação de diagramas de estabilização em SEP, foi encontrada uma única referência, a de (JINGMIN et al., 2011) que utiliza o diagrama de estabilização para identificar os modos eletromecânicos em um sistema teste de GET de 118 barras. O diagrama de estabilização apresentado é formado pela sobreposição, em um plano complexo, dos modos eletromecânicos estimados para modelos de diferentes ordens.

Portanto, considerando a escassez de estudos envolvendo a aplicação de diagramas de estabilização para a identificação de modos eletromecânicos em SEP, principalmente, no contexto de redes de distribuição com GD, a presente dissertação de mestrado busca contribuir com uma proposta de diagrama de estabilização que seja eficiente na identificação dos modos físicos, além de apresentar as informações mais importantes dos modos oscilatórios (ou seja, amortecimento e frequência). Destaca-se que o diagrama de estabilização proposto nesta dissertação é de fácil implementação computacional e de fácil interpretação por parte do operador do sistema (dois recursos que são altamente valorizados pela indústria)(ZIBETTI et al., 2011).

O diagrama de estabilização proposto mantém a premissa que modos eletromecânicos físicos são pouco sensíveis a variação da ordem do modelo. Tendo em vista as peculiaridades dos SEP foi incluído o amortecimento dos modos no diagrama de estabilização. Para tanto utilizamos um modelo de histograma, com o amortecimento e frequência dos modos eletromecânicos de modelos de diferentes ordens representados em um plano x-y, e o eixo z, eixo vertical, indicando a incidência desses modos por cada região (ou célula) do histograma.

Neste trabalho, o processo de estimação e classificação dos modos eletromecânicos é realizado da seguinte forma: coleta de dados ambientes, pré-processamento desses sinais, estimação dos modos pelos métodos de decomposição modal e uma etapa de pós-processamento com a classificação desses modos eletromecânicos pela técnica de diagrama de estabilização proposta.

A aquisição dos dados ambientes de redes de distribuição é realizada de duas formas, pelas simulações computacionais de dois sistemas testes de redes de distribuição e através de medições fasoriais realizadas por μ PMU instaladas no centro politécnico da Universidade Federal do Paraná.

A instalação das μ PMU faz parte do monitoramento da minirrede que está sendo implementada com a parceria entre a UFPR e a Copel. Esse projeto de pesquisa contempla mais de 1,35MW com geração fotovoltaica e 50KW com geração a biodiesel além de um laboratório

para o monitoramento e pesquisa dessa minirrede com GD.

Já os dados ambientes provenientes das simulações computacionais da operação ambiente dos sistemas testes é realizada com o auxílio dos programas ANATEM, ANAREDE e Pacdyn, desenvolvidos pelo CEPEL, sendo considerada uma parcela da carga dos sistemas modelada para representar o comportamento aleatório da cargas nas redes de distribuição que resultam em uma resposta ambiente dos sistemas testes (PRIOSTE et al., 2011).

O primeiro sistema teste é o modelo de uma rede de distribuição real, com 32 barras e quatro turbogeradores, localizada no interior do estado de São Paulo (KUIAVA et al., 2008). O segundo sistema teste apresenta uma rede de distribuição de 37 barras com grande penetração de GD, representadas por diferentes tecnologias, geração hidráulica, eólica e fotovoltaica, e a presença de cargas estáticas e dinâmicas (KONTIS et al., 2018).

Os sinais provenientes de operação ambiente são tratados na etapa de pré-processamento e utilizados em três cenários diferentes para o processamento através dos métodos de decomposição modal, N4SID e YW (TRUDNOWSKI; PIERRE, 2009). Os métodos N4SID e YW são empregados nesta pesquisa por serem métodos bem empregados na estimação de modos eletromecânicos em sinais provenientes da operação ambiente do sistema. O primeiro cenário investiga a influência no processo de estimação modal da aleatoriedade da carga, o segundo cenário a influência do ruído de medição e o terceiro cenário a aleatoriedade da carga com ruído de medição nos modelos estimados.

Com o modelo estimado pelos métodos de decomposição modal, tem início a etapa de pós-processamento, com a aplicação da técnica de diagrama de estabilização proposta para classificar os modos eletromecânicos entre modos físicos e espúrios a partir do modelo estimado pelos métodos de decomposição modal. Destaca-se que o objetivo principal é identificar o modo físico dominante do sistema em detrimento aos modos espúrios.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Principal

O objetivo principal desta dissertação é desenvolver uma ferramenta computacional para a identificação de modos dominantes (no caso, eletromecânicos), em detrimento aos modos espúrios, em sistemas de distribuição com GD a partir da estimação modal aplicada em sinais ambientes coletados de μ PMU.

1.1.2 Objetivos específicos

- 1) Propor uma adaptação da técnica de diagrama de estabilização para a identificação de modos físicos, no contexto de estabilidade angular a pequenas perturbações de SEP.
- 2) Realizar um estudo comparativo entre duas técnicas de estimação modal baseadas

em dados ambientes, no caso, o N4SID e Yule Walker, buscando identificar vantagens e desvantagens de cada uma delas.

3) Validar a proposta de diagrama de estabilização e realizar os estudos comparativos entre as técnicas de estimação modal de interesse em dois sistemas teste de distribuição de energia elétrica com GD.

4) Realizar os estudos apontados no objetivo anterior em dados ambientes coletados pelas μ PMU localizadas na UFPR.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado está estruturada da seguinte forma:

- No capítulo 2 é descrito os métodos de decomposição modal e apresentado os métodos empregados neste estudo.
- No capítulo 3 é apresentado as etapas para estimar os modos eletromecânicos e o diagrama de estabilização proposto para SEP.
- No capítulo 4 são apresentados os sistemas testes de redes de distribuição empregados além dos testes e resultados obtidos.
- Por último, o capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas nesta dissertação de mestrado.

2 OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos que fundamentam a análise da estabilidade do ângulo do rotor sob pequenas perturbações, com foco na operação ambiente de redes de distribuição.

Assim, é inicialmente apresentada a definição e classificação geral de estabilidade de SEP conforme apresentado por (KUNDUR P, 2004). Na sequência é discutida a estabilidade do ângulo do rotor sob pequenas perturbações, buscando elucidar a natureza dos fenômenos oscilatórios causadores da instabilidade em questão, contextualizando com as redes de distribuição com GD. Por último são apresentadas as abordagens utilizadas para análise das oscilações eletromecânicas imersas na rede, sendo elas a análise do modelo conceitual e métodos de decomposição modal aplicados em sinais obtidos de medições fasoriais sincronizadas.

2.1 ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

A estabilidade de SEP tem preocupado engenheiros e pesquisadores desde a década de 1920 na busca de uma operação segura e confiável do fornecimento de energia elétrica frente as diversas perturbações que afligem constantemente o sistema (KUNDUR P, 2004). A necessidade de suprir uma crescente demanda por energia elétrica, tem estimulado o desenvolvimento de sistemas elétricos cada vez maiores e mais complexos. Concatenado a essa evolução do SEP, perturbações no sistema manifestam novas dinâmicas na rede, trazendo continuamente novos desafios para a estabilidade dos sistemas de potência.

Nesse sentido, (KUNDUR P, 2004) definem que:

"Estabilidade é a habilidade de um sistema elétrico de potência, para dada condição inicial de operação, atingir um estado em equilíbrio de operação depois de submetido a uma perturbação física, com a maioria de suas variáveis limitadas de modo que praticamente todo sistema permaneça intacto."

Dessa forma, a estabilidade do sistema dependerá tanto das condições de operação no momento da ocorrência da perturbação quanto da natureza e intensidade da mesma. Essas perturbações podem se apresentar na forma de curto-circuitos na rede, entrada ou saída de linhas de transmissão ou geradores, mas também ocorrem durante a operação ambiente do sistema, essa caracterizada por pequenas variações de carga que acontecem natural e continuamente no sistema. Essas oscilações de carga tem comportamento aleatório e podem ser comparadas com um ruído branco imerso nas variáveis do sistema (KUNDUR P, 2004)(THAMBIRAJAH, 2010).

Para facilitar o estudo da estabilidade de sistemas elétricos de potência buscou-se classificá-los em sub-problemas. Em um primeiro nível, a classificação se dá quanto a natureza física do mecanismo que resulta na instabilidade e, em um segundo nível, quanto ao tamanho da perturbação exercida sobre o sistema. Por último, quanto ao intervalos de tempo necessário para se avaliar a estabilidade. Dessa forma, simplificações podem ser feitas para o estudo de cada uma dessas categorias de estabilidade do sistema. A Figura 1 apresenta essa classificação, sendo a presente pesquisa focada na estabilidade do ângulo do rotor frente a pequenas perturbações ou distúrbios (KUNDUR P, 2004).

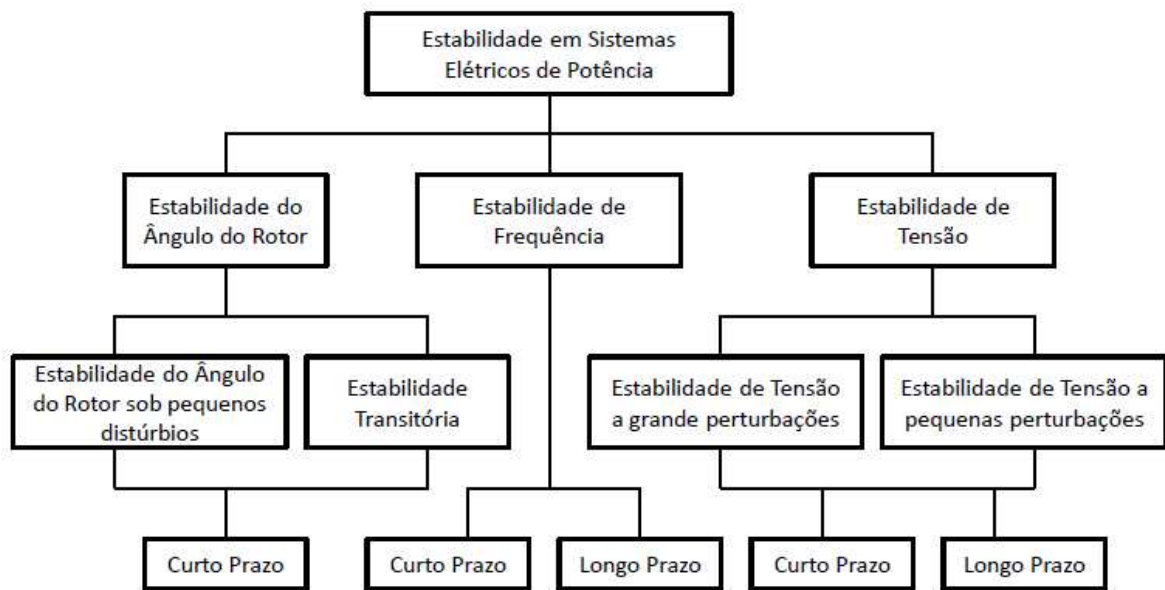


FIGURA 1 – Classificação de estabilidade de sistemas elétricos de potência

2.2 ESTABILIDADE DO ÂNGULO DO ROTOR SOB PEQUENAS PERTURBAÇÕES

A questão chave da estabilidade do ângulo do rotor está na capacidade dos geradores síncronos conectados ao sistema de manter o sincronismo após a ocorrência de uma perturbação. O ângulo e a velocidade do rotor dos geradores permanecem constantes caso exista equilíbrio entre o torque eletromagnético (referente a potência elétrica disponibilizada pelo gerador) e o torque mecânico (referente a potência mecânica aplicada ao eixo do gerador). A ocorrência de alguma perturbação resulta no desequilíbrio entre essas forças e conseqüente aceleração ou desaceleração dos rotores dos geradores de acordo com as equações *swings* e as leis que governam a rotação de corpos girantes (KUNDUR, 1994),(ROGERS, 2000).

As oscilações resultantes desse desequilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque mecânico se propagam pelas linhas de transmissão do sistema interligado e acabam se refletindo no comportamento de rotores de outras máquinas acopladas ao sistema. Essas oscilações eletromecânicas são vistas, portanto, como uma composição de diferentes dinâmicas de natureza

oscilatória, caracterizadas principalmente por uma frequência e fator de amortecimento, denominadas de modos de oscilação. Vários desses modos de oscilação estão presentes no sistema, porém, em se tratando da estabilidade do ângulo do rotor frente a pequenas perturbações, as oscilações eletromecânicas de maior interesse são aquelas de baixa frequência, situadas entre 0,1Hz e 3 Hz em sistemas de GET (KUNDUR, 1994)(ROGERS, 2000), e frequências de até 6Hz em redes de distribuição com GD.

Considerando que as oscilações de baixa frequência são estimuladas por pequenas perturbações, como as oscilações de carga da rede e curto-circuitos de pequena intensidade, os distúrbios considerados causam excursões pequenas no ângulo do rotor, podendo dessa forma, ser realizada uma análise linearizada em torno do ponto de operação do sistema (KUNDUR P, 2004).

Assim, esses modos oscilatórios se manifestam como modos locais e interárea, em sistemas de GET e como modos globais em redes de distribuição (KUIAVA et al., 2008). Nesta pesquisa busca-se estimar os modos globais, quando analisados dados do sistema teste 1 e 2, e modos interárea quando analisados dados reais coletados por μ PMU.

2.3 OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Os problemas relacionados a modos eletromecânicos mal amortecidos estão associados a presença de geradores síncronos ligados à rede. Com uma matriz energética em SEP predominantemente vinculada a sistemas de GET, essas oscilações eletromecânicas acabavam ficando restritas a estes sistemas. Assim, até pouco tempo atrás grande parte dos esforços direcionados para pesquisa desses fenômenos também tinham como principal interesse os efeitos em sistemas de GET (TRUDNOWSKI, 2008)(TRUDNOWSKI; PIERRE, 2009).

Porém, atualmente, fatores técnicos, econômicos e sociais tem tornado cada vez mais interessante e viável a operação de plantas de geração de energia de menor porte, conectadas não mais somente nos sistemas de transmissão, mas diretamente nas redes de distribuição, próximas ao consumidor final. Conhecidas como GD, essas usinas possibilitam um melhor aproveitamento e diversificação da matriz energética dos SEP, com menores perdas de transmissão por estarem próximas a carga. Além disso, devido ao seu menor porte, necessitam menores volumes de investimento e um prazo menor para sua construção e entrada em operação, apresentando em sua grande maioria impactos ambientais menores comparados a grandes empreendimentos (PATACA, 2015).

Esse cenário se apresenta muito promissor para o SEP Brasileiro, que possui grande potencial hidrológico para a implantação de PCH, um regime de ventos propício a geração eólica e uma localização geográfica também muito favorável a geração fotovoltaica. Além do potencial de aproveitamento de resíduos de biomassa em plantas de cogeração de energia,

nessa se destaca a indústria de açúcar e álcool com o aproveitamento do bagaço de cana de açúcar (KUIAVA et al., 2008)(PATACA, 2015).

Essa tendência crescente na utilização de GD, tem mudado o comportamento de redes de distribuição passivas, para redes de distribuição ativas, trazendo questionamentos de quais serão os impactos das GDs nas redes de distribuição (KUIAVA et al., 2008)(SALIM et al., 2011).

Vários pesquisadores tem nos últimos anos investigado o problema das oscilações eletromecânicas de baixa frequência em sistemas de distribuição com geração distribuída. Por exemplo, (KUIAVA et al., 2008), destaca que a presença de geradores de menor porte, com potência e inércia menores quando comparados aos sistemas de GET, além do fato das redes de distribuição apresentam uma topologia predominantemente radial e com condutores com resistência maior que linhas de transmissão de alta tensão, afetam a frequência e o amortecimentos dos modos eletromecânicos.

Outra característica relevante em redes de distribuição está na sua proximidade com as cargas, sendo sujeito a maiores flutuações de carga e desequilíbrio entre as fases, tornando difícil a definição de um ponto de operação para essas redes. (FERNANDES et al., 2017), por exemplo, aborda o problema analisando o efeito de diferentes níveis do desbalanço entre as fases em uma rede de distribuição na identificação dos modos eletromecânicos.

Já (SALIM et al., 2011) apresenta um estudo em redes de distribuição com a presença de GD, onde considera dois tipos de controle de excitação nos geradores síncronos, sendo o controle pela tensão e controle pelo fator de potência, com foco no segundo pela sua maior utilização no controle da corrente do rotor das máquinas síncronas. É realizada então uma análise comparativa dos sistemas de controle de excitação em diferentes níveis de penetração de GD.

Em outro trabalho, (ALLEN et al., 2012) busca monitorar eventos e oscilações eletromecânicas através de medições fasoriais sincronizadas no tempo coletadas por PMU em um nível de tensão de consumidores (120V). Três análises comparativas são realizadas para atestar a qualidade das medições realizadas em redes de distribuição. A primeira compara a fase do ângulo da tensão medida na rede de distribuição com a fase do ângulo de tensão do estimador de estados no sistema de transmissão. A segunda análise compara os sinais coletados de PMU instaladas em redes de distribuição com sinais de PMU instalados em sistemas de GET, isso durante uma resposta transiente do sistema. E por último é aplicado métodos de decomposição modal em dados ambientes coletados em redes de distribuição e em sistemas de GET próximos, e comparando as estimativas das oscilações eletromecânicas obtidas.

2.4 ABORDAGENS MATEMÁTICAS PARA ANÁLISE DAS OSCILAÇÕES ELETROMECA- NICAS DE BAIXA FREQUÊNCIA

O principal objetivo pretendido com a análise da estabilidade à pequenas perturbações está em estimar quais modos eletromecânicos estão presentes na rede e se os mesmos estão suficientemente amortecidos de forma que nenhum desses modos seja amplificado a ponto de causar a perda de sincronismo das máquinas. Duas abordagens podem ser utilizadas para a estimação desses modos oscilatórios. A primeira delas realiza uma análise do sistema linearizado do modelo conceitual, e a segunda se baseia em métodos de decomposição modal aplicados em sinais coletados da operação em tempo real do sistema, principalmente, por meio de unidades de medição fasorial sincronizada (PMUs).

O modelo conceitual do sistema relaciona as equações físicas que regem o comportamento dos componentes de interesse no sistema elétrico, como por exemplo, os geradores síncronos e seus controles, transformadores e linhas de transmissão dentre outros, definindo um modelo não linear que governa o sistema. Considerando pequenas perturbações, esse modelo é então linearizado em torno de um ponto de operação, simplificando a obtenção da resposta do modelo. A formulação do modelo conceitual do sistema será detalhada a seguir, tendo em vista que com ela é possível apresentar e discutir conceitos importantes a respeito da estabilidade do ângulo do rotor em SEPs. Porém, em sistemas reais ela se torna praticamente impraticável pois se faz necessário conhecer todos elementos que compõem o sistema afim de gerar um modelo fidedigno para fins de estudos de estabilidade, além de conhecer exatamente todas as cargas conectadas para que se possa determinar o ponto de operação do sistema (KUNDUR, 1994).

Já os métodos de decomposição modal necessitam apenas de medições fasoriais sincronizadas no tempo, para através da análise do espectro desses sinais ou da geração de um modelo caixa preta (gerado com base na teoria de sistemas lineares, por exemplo), obter uma estimativa dos modos presentes no sistema (TRUDNOWSKI, 2008)(LEANDRO et al., 2015).

2.4.1 Modelo Conceitual

O modelo conceitual de um SEP para estudos de estabilidade em regime dinâmico é formado por um conjunto de equações algébrico-diferenciais não-lineares. Esse modelo é formado pelas equações de fluxo de potência do SEP, junto com as equações de *swings* dos geradores (que relacionam o torque elétrico e mecânico com o ângulo do rotor dos geradores) e as equações que regem o comportamento do campo elétrico do estator das máquinas (tanto as equações de regime transitório e sub transitório, como as de eixo direto e em quadratura), além das equações relacionadas aos controladores associados as essas máquinas. Este modelo altamente não-linear do sistema apresenta grande complexidade para se encontrar uma solução analítica para o comportamento do sistema (KUNDUR, 1994).

Porém, como mencionado, quando sujeito a pequenas perturbações, as variáveis do

sistema apresentam poucas variações em relação ao ponto de operação em regime permanente, ou seja, de um ponto de equilíbrio do sistema. Dessa forma, a trajetória percorrida pelas variáveis na representação de espaço de estados do sistema permanece nas imediações do ponto de equilíbrio, e uma aproximação linearizada em torno desse ponto de operação pode ser utilizada para simplificação do problema, sem perdas significativas da qualidade da resposta do SEP, (KUNDUR, 1994).

Por uma questão de conveniência, o modelo conceitual será discutido a partir de sua representação não-linear em espaço de estados descrita apenas por equações diferenciais, considerando que para modelos específicos de geradores, cargas, etc, é possível adotar hipóteses simplificadoras de modelagem e artifícios matemáticos que eliminam as restrições algébricas do modelo antes mesmo da aplicação do procedimento de linearização. Assim, o modelo conceitual não-linear pode ser escrito na forma:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.1)$$

em que $x \in R^n$ é o vetor de estados, $\dot{x} \in R^n$ é o vetor da derivada dos estados em relação ao tempo, $u \in R^r$ é o vetor de entradas e $f = [f_1 f_2 \cdots f_n]'$, em que $f_i : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}$, $i = 1, 2, \dots, n$, é o vetor com funções não-lineares de x e u . É possível ainda determinar os sinais de saída de interesse, onde $y \in R^m$ é escrito em função das variáveis de estado e das variáveis de entrada, conforme a seguir:

$$y = g(x, u) \quad (2.2)$$

O processo de linearização tem início com a expansão do modelo em séries de Taylor em torno de um ponto de equilíbrio. Sendo x_e o vetor de estado no ponto de equilíbrio e u_e o vetor de entrada nesse ponto de equilíbrio podemos reescrever a equação (2.1) conforme abaixo:

$$\dot{x}_e = f(x_e, u_e) = 0 \quad (2.3)$$

Uma pequena perturbação do sistema é considerada como uma pequena variação no vetor de estados e no vetor de entrada do sistema, Δx e Δu respectivamente, em torno de um ponto de equilíbrio, ou seja:

$$x = x_e + \Delta x \quad u = u_e + \Delta u \quad (2.4)$$

Incluindo (2.4) em (2.1) obtém-se:

$$\dot{x} = \dot{x}_e + \Delta \dot{x} = f(x_e + \Delta x, u_e + \Delta u) \quad (2.5)$$

Expandindo a equação (2.5) em séries de Taylor e desprezando os termos a partir da segunda ordem, obtém-se:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= \dot{x}_{e_i} + \Delta\dot{x}_i = f_i(x_e + \Delta x, u_e + \Delta u) \\ &\approx f_i(x_e, u_e) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1}\Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n}\Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1}\Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_n}\Delta u_n\end{aligned}\quad (2.6)$$

Usando (2.3), é possível simplificar a equação (2.6) da seguinte forma:

$$\Delta\dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1}\Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n}\Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1}\Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_n}\Delta u_n\quad (2.7)$$

De forma similar para as j saídas, $j = 1, 2, \dots, m$, tem-se que:

$$\Delta y_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1}\Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n}\Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1}\Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_n}\Delta u_n\quad (2.8)$$

Com as equações linearizadas (2.7) e (2.8) do sistema podemos escrever o modelo em espaço de estado do sistema:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{x} &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x + D\Delta u\end{aligned}\quad (2.9)$$

em que:

$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} & B &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} & D &= \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial u_n} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (2.10)$$

Podemos definir as matrizes (2.10) como:

- A é a matriz de estados com dimensão $n \times n$;
- B é a matriz de entrada de controle com dimensão $n \times r$;
- C é a matriz de saída com dimensão $m \times n$;
- D é a matriz de transmissão direta com dimensão $m \times r$;

Pela matriz de estados A , tem-se a parcela da resposta do sistema que é excitada pelas condições iniciais. Esta parcela tem a informação da transição dos estados de uma condição inicial $t = 0$ para qualquer outro instante t quando as entradas são nulas. Assim, podemos representar a resposta do sistema através dos autovalores e autovetores da matriz A . Dessa forma, os autovalores e autovetores, obtidos para determinado ponto de operação, podem ser utilizados para a análise da estabilidade dos sistema.

Pode-se definir os autovalores como parâmetros escalares λ que solucionam a equação abaixo (KUNDUR, 1994):

$$A\Phi = \lambda\Phi \quad (2.11)$$

sendo que, Φ é um vetor com dimensão $n \times 1$.

Para se obter uma solução não trivial da equação (2.11), é necessário que:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (2.12)$$

O desenvolvimento da equação (2.12) resulta em um polinômio de grau n na variável λ , conhecido como equação característica de A . As raízes desse polinômio característico são os autovalores associados a matriz A .

Retornando à equação (2.11) com os autovalores encontrados, pode-se encontrar os autovetores a direita, Φ da matriz A .

Com base na teoria de sistemas lineares podemos escrever a resposta analítica no domínio do tempo com uma condição inicial e entrada nula como uma combinação dos autovalores e autovetores da matriz A , supondo n autovalores distintos, da seguinte forma (CHEN, 1999):

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i v_i e^{\lambda_i t} \quad (2.13)$$

em que $\lambda_i \in \mathbb{C}^n$ corresponde ao i – éximo autovalor e $v_i \in \mathbb{C}^n$ corresponde ao i – éximo autovetor da matriz de estados A , e $c_i \in \mathbb{C}^n$ é a i – éxima constante que é associada ao estado inicial $x(0)$, sendo $i = 1, \dots, n$.

Cada autovalor λ_i também pode ser chamado de modo de resposta, pois caracteriza uma parcela da resposta do sistema no tempo, através da função exponencial $e^{\lambda_i t}$. Com uma análise da resposta da equação (2.13) pode-se estabelecer uma relação com a estabilidade do sistema.

Os autovalores reais encontrados correspondem a modos não oscilatórios. Quando o autovalor real for negativo, a exponencial determinada por $e^{\lambda_i t}$ irá decrescer ao longo do tempo, indicando um sistema estável. Com um autovalor real positivo, o modo de resposta irá corresponder a uma exponencial crescente indicando um sistema instável.

Caso os autovalores sejam números complexos, estes correspondem a modos oscilatórios. Os autovalores complexos se apresentam em pares conjugados, com a parte real correspondente ao decaimento e a parte imaginária correspondente a frequência do modo oscilatório. Com o mesmo raciocínio utilizado para autovalores reais, autovalores complexos com parte real negativa tem resposta atenuada ao longo do tempo, indicando sistema estável. Da mesma forma, autovalores complexos com parte real positiva são indicação de um sistema instável.

A partir do autovalor complexo dado por,

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad (2.14)$$

podemos calcular a frequência e o amortecimento dos modos oscilatórios, conforme equações abaixo.

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (2.15)$$

$$\xi_i = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \times 100 \quad (2.16)$$

sendo σ_i e ω_i a parte real e imaginária, respectivamente, do i -ésimo autovalor, f_i a frequência e ξ_i o amortecimento do referido modo.

No entanto nem todos os modos oscilatórios são modos eletromecânicos, para identificá-los é preciso saber quais modos oscilatórios se manifestam nas grandezas eletromecânicas do sistema em sua representação em espaços de estados (ângulo do rotor e velocidade angular), isto é feito pela análise de fatores de participação, que é baseada na análise dos autovetores da matriz de estado A .

2.4.2 Métodos de decomposição modal

Os métodos de decomposição modal calculam estimativas dos modos eletromecânicos presentes no sistema utilizando medições fasoriais sincronizadas coletadas por PMU, não sendo necessário conhecer os parâmetros de operação da rede, como a análise via modelo conceitual do sistema (WIES et al., 2003)(TRUDNOWSKI; PIERRE, 2009). Como os SEP estão submetidos a constantes mudanças de configurações da topologia da rede e mudanças no nível de carregamento de carga (principalmente em redes de distribuição), a abordagem via métodos de decomposição modal se torna mais atraente e viável na obtenção de estimativas dos modos eletromecânicos em sistemas reais, isso pelo fato de não precisar manter o modelo conceitual do sistema atualizado.

2.4.2.1 μ PMU's

O desenvolvimento das PMU possibilitou a ampliação do monitoramento da operação dos SEP, tornando possível trabalhar com dados obtidos de diferentes pontos do sistema

(independente da distância geográfica das medições) com a mesma estampa de tempo (sincronizados), impulsionando o desenvolvimento dos métodos de decomposição modal. Esses métodos são capazes de decompôr o sinal amostrado, extraindo informações a respeito das dinâmicas dos modos eletromecânicos que estão imersos nas variáveis medidas da rede elétrica, como tensão, frequência, defasagem angular do fluxo de potência entre as barras, etc...(PHADKE, 2002).

Porém, a utilização das PMU para medições em redes de distribuição com GD precisou ser aprimorada, levando ao desenvolvimento das μ PMU. Como em redes de distribuição o impacto da GD acarreta variações mais rápidas nos ângulos de tensão e corrente, assim, se mostrou necessária a utilização de equipamentos mais precisos e com uma amostragem maior para observar o comportamento de redes de distribuição com GD (VON MEIER et al., 2014).

Destaca-se que a utilização de μ PMU está inserida em um contexto mais amplo do monitoramento de redes de distribuição com GD, sendo a detecção de modos eletromecânicos uma das aplicações de diagnóstico que podem ser realizadas a partir dos dados coletados. A detecção de operação ilhada da rede de distribuição, verificação da topologia, desbalanço e identificação de fase, fluxo de potência reverso, estimação de estados, localização de falta, dentre outras aplicações, fazem parte do arcabouço de possibilidades da análise de dados sincronizados no tempo coletados por μ PMU (MEIER, 2014).

As μ PMU tem a capacidade de operar com uma taxa de amostragem mais elevada que as PMU convencionais, podendo realizar até 120 medições de fasores de tensão e corrente por segundo, com resolução angular de $0,001^\circ$ nos fasores amostrados (POLEDNA et al., 2019). Além disso, o fato das μ PMU conterem instrumentos de medição, armazenamento interno de dados, comunicação própria, uma antena receptora de GPS e uma bateria para *backup*, traz confiabilidade no monitoramento das redes de distribuição, pois uma falha no suprimento de energia para o equipamento não impede sua operação.(MEIER, 2014).

2.4.2.2 Classificação dos métodos de decomposição modal

Os métodos de decomposição modal podem ser classificados conforme a Figura 2 (THAMBIRAJAH, 2010).

O primeiro nível na classificação dos métodos está associado a condição operativa ou ao tipo de perturbação que está atuando no sistema elétrico. A condição pode ser ambiente ou transitória e estimular uma resposta dos sistema elétrico. Uma resposta ambiente do sistema é observada quando os modos são estimulados apenas pelas pequenas variações de carga que acontecem naturalmente e de forma aleatória na rede, estimulando uma resposta também aleatória nos ângulos dos rotores, apresentando um comportamento com características randômicas como um ruído branco. Os métodos adequados ao processamento de uma resposta ambiente são também conhecidos como métodos *Mode-Meters* (THAMBIRAJAH, 2010) (TRUDNOWSKI; PIERRE, 2009).

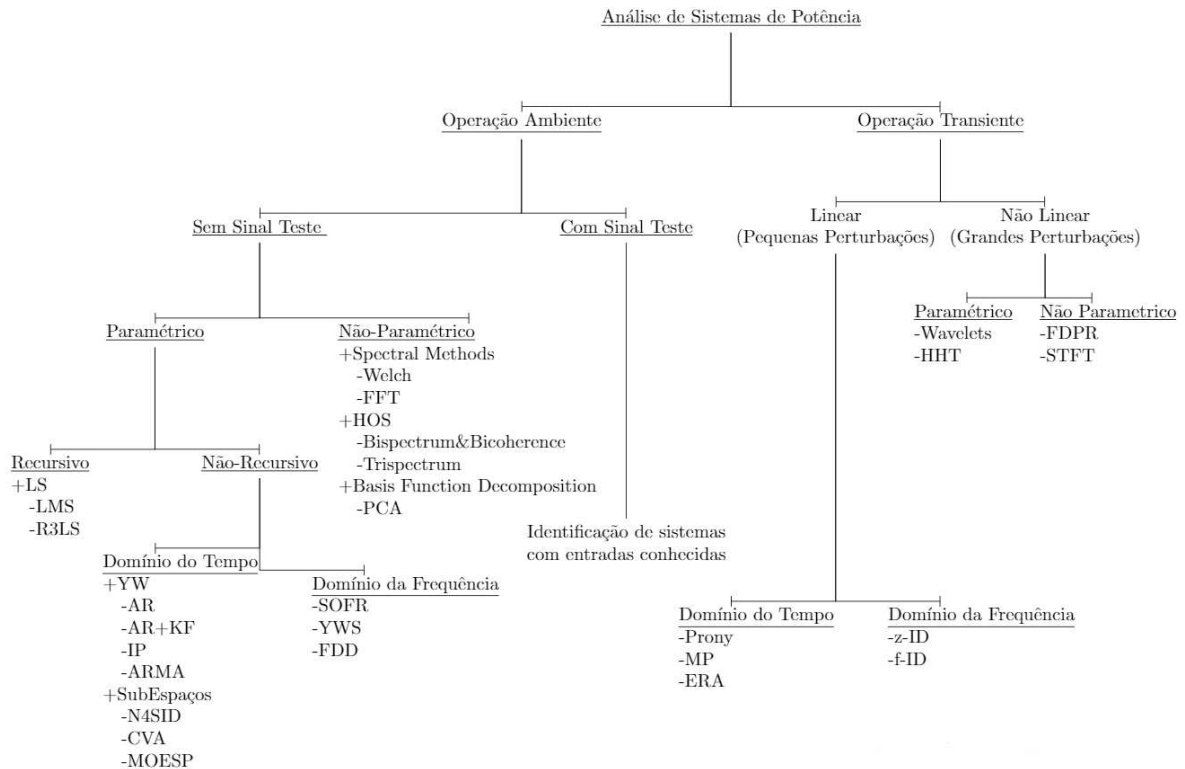


FIGURA 2 – Classificação dos métodos de decomposição modal

Fonte: – Figura adaptada de(THAMBIRAJAH, 2010)

Já uma resposta transiente do sistema é observada quando os modos eletromecânicos são estimulados pela ocorrência de algum transitório na rede elétrica, como um curto-circuito ou desconexão de linhas de transmissão, entrada ou saída de operação de geradores, dentre outros. Respostas transientes do sistema podem ser caracterizadas por maiores variações na frequência do sistema e no fluxo de potência entre as linhas, quando comparadas com as respostas ambientes (THAMBIRAJAH, 2010).

Os métodos baseados em resposta transiente podem ainda ser classificados entre métodos lineares, para pequenas perturbações e métodos não lineares, para grandes perturbações, conforme mostrado na Figura 2 (THAMBIRAJAH, 2010). Vale destacar que uma resposta transiente do sistema pode ser considerada uma pequena perturbação, desde que o sistema não se afaste muito do ponto de operação inicial. Assim, ainda é possível utilizar análises lineares para estimar os modos eletromecânicos. A subcategoria dos métodos baseados em resposta transiente contemplam métodos chamados de *Ringdown*.

Dentre os métodos para análise em resposta transiente do sistema, pode-se destacar o método VF multi-sinais empregado para estimar modos eletromecânicos de sistemas de GET interconectados (SCHUMACHER et al., 2019). Ainda, métodos baseados em respostas transientes vem sendo estudados no contexto de redes de distribuição com GD. Em (RAMOS, 2016) e (KUIAVA R RAMOS, 2017), por exemplo, um sistema teste de rede de distribuição é utilizado para comparar o desempenho de três métodos da categoria *Ringdown*, no caso, o ESPRIT,

TLS-ESPRIT e WTLS-ESPRIT em suas versões multi-entradas. Já em (FERNANDES, 2012) são utilizados os métodos Prony e ESPRIT para estudos em rede de distribuição desbalanceada com GD.

Os métodos *Mode-Meters*, se apresentam mais adequados para monitorar sinais com uma grande relação sinal/ruído, pois conseguem trabalhar com sinais com presença significativa de ruído. Sob condição de estresse ou perto da capacidade máxima da transferência de potência do sistema o amortecimento dos modos eletromecânicos tende a se deteriorar, dessa forma, acompanhar a operação ambiente pode fornecer bons indicativos sobre a estabilidade do sistema (TRUDNOWSKI; PIERRE, 2009), (TRUDNOWSKI, 2008).

A primeira diferenciação dentre os métodos *Mode-Meters* está em métodos que utilizam um sinal teste para gerar uma estimativa dos modos presentes (empregados em ambientes controlados onde é possível medir a carga que irá estimular o modos, ou algum outro sinal que possa ser introduzido ao sistema), e os métodos onde não se conhece os sinais que estimulam o sistema, mais condizente com a realidade dos sistemas elétricos pela dificuldade em se obter os valores das cargas durante a operação dos SEP (THAMBIRAJAH, 2010).

Os métodos sem sinais testes são então divididos entre métodos paramétricos e não-paramétricos (THAMBIRAJAH, 2010). Os métodos não-paramétricos utilizam os sinais amostrados para obter as características do próprio sinal, geralmente analisando o espectro desse sinal. Os principais métodos dessa classe são a transformada rápida de Fourier (FFT) e o *Welch*, que fazem uma análise do espectro do sinal, decompondo o sinal em um conjunto de componentes oscilatórias caracterizadas com uma magnitude e uma fase (WELCH, 1967). Esses métodos fornecem boas estimativas das frequências dos modos presentes, mas não fornecem de forma precisa o amortecimento desses modos (THAMBIRAJAH, 2010).

Por outro lado, os métodos paramétricos buscam gerar um modelo caixa preta a partir dos dados ambientes coletados, e realizar os estudos dos modos oscilatórios através do modelo estimado. A construção desse modelo pode ser realizada de forma recursiva ou não recursiva (TRUDNOWSKI; PIERRE, 2009), (TRUDNOWSKI, 2008).

Em métodos recursivos a cada nova amostra obtida o modelo do sistema é atualizado, sendo que as amostras mais recentes tem peso maior na estimativa do modelo. O método recursivo de maior destaque utiliza a técnica de filtros adaptativos conhecida como *least-squares algorithms* (LS), que busca estimar um modelo para um conjunto de dados assumindo uma forma funcional para a entrada de uma função de densidade de probabilidade e minimizando uma função custo que penaliza a soma do quadrado do erro entre os valores observados e os valores estimados pelo modelo. O método *The Least Means Squares* (LMS) utiliza uma forma diferente de calcular o peso dos filtros adaptativos, sendo que o R3LS apresenta uma evolução do LMS, onde valores iniciais para o filtro adaptativo são definidos inicialmente para aumentar a velocidade de convergência da solução (ZHOU et al., 2007), (THAMBIRAJAH, 2010).

Por sua vez os métodos não recursivos estimam um modelo para o sistema a cada janela de dados, por isso são também conhecidos como métodos por processamento de blocos. A cada novo conjunto de dados uma nova estimativa do modelo é calculada, sendo que todas as amostras pertencentes a janela considerada tem o mesmo peso na estimativa do modelo. A obtenção de modelos de forma não recursiva pode ainda ser realizada no domínio do tempo, onde são utilizados os dados ambientes no domínio do tempo e no domínio da frequência onde o espectro dos dados ambientes medidos são utilizados para calcular o modelo (THAMBIRAJAH, 2010), (TRUDNOWSKI; PIERRE, 2009) (TRUDNOWSKI, 2008).

Referente a métodos paramétricos não recursivos no domínio do tempo, tem-se os métodos baseados em subespaços e os métodos YW. Dois métodos baseados em subespaços de estados são comparados em (JAMALUDIN et al., 2013). Em (JINGMIN et al., 2011) é utilizado o método N4SID para um sistema teste IEEE-118 de um sistema de GET. A análise em sistemas de GET interconectados também é realizada pelo método N4SID em (LEANDRO et al., 2015), apresentando resultados do SIN.

Dentre os métodos YW, pode-se destacar o trabalho de (PIERRE, 1997), que apresenta os primeiros resultados na utilização de dados ambientes para o método. Em (WIES et al., 2003), um modelo ARMA (auto-regressivo de médias móveis) da família de métodos YW aplicado em um sistema teste com 19 máquinas síncronas. Em (DOSIEK et al., 2013) é utilizado um modelo ARMAX (auto-regressivo com média móvel e entrada exógena), para a estimação de modos de um modelo de ordem reduzida do sistema *Western Electricity Coordinating Council* (WECC) que interliga o noroeste do sistema elétrico dos Estados Unidos com o Canadá. Já em (TRUDNOWSKI, 2008) é realizado um estudo comparativo entre três métodos, YW no domínio do tempo, o YWS, que trabalha no domínio da frequência e o método N4SID.

Dentre os trabalhos que aplicam métodos de decomposição modal para estudos de redes de distribuição, podemos destacar (PATACA, 2015), que realiza o estudo tanto com operação ambiente, como com operação transiente, utilizando o método *Mode Meter* paramétrico N4SID e o método *Ringdown* Prony.

Já em, (KONTIS et al., 2018), é apresentado uma revisão de oito métodos de análises *Ringdown* aplicados em redes de distribuição com GD. Os métodos utilizados foram, Prony, ERA (*eigensystem realization algorithm*), *Matrix Pencil*, N4SID, PEM (prediction error method), Vector fitting e a análise multi-sinal.

Nessa trabalho serão utilizados dois métodos paramétricos não recursivos no domínio do tempo, o método YW (TRUDNOWSKI, 2008)(DOSIEK et al., 2013), que gera um modelo auto-regressivo, modelo AR, e o método N4SID, que gera uma representação em espaços de estados para o modelo do sistema (TRUDNOWSKI, 2008). Ambos os métodos serão descritos no próximo capítulo.

3 METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE MODOS ELETROMECCÂNICOS

Este capítulo traz a metodologia empregada para a identificação e classificação dos modos eletromecânicos a partir de dados ambientes em redes de distribuição. É apresentado um detalhamento da forma utilizada para tratamento desses sinais, com a etapa de pré-processamento do sinal ambiente, a estimação dos modos eletromecânicos através de métodos de decomposição modal na etapa de processamento dos dados e uma etapa de pós-processamento (a qual se baseia no diagrama de estabilização proposto), com identificação dos modos físicos, em detrimento aos modos espúrios, dentre o conjunto de modos estimados. O fluxograma abaixo apresenta essas etapas.

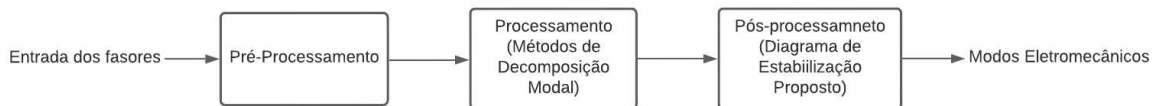


FIGURA 3 – Fluxograma do processo de estimação modal

A técnica de diagrama de estabilização, responsável pela classificação entre modos físicos e espúrios no pós-processamento é discutida, sendo apresentada a formulação convencional e a formulação proposta deste trabalho para a sua adaptação para SEP.

3.1 ETAPA DE PRÉ-PROCESSAMENTO

O tratamento dos sinais amostrados na etapa de pré-processamento melhora o condicionamento numérico dos métodos de decomposição modal, assim, melhorando a qualidade das estimativas calculadas. Algumas boas práticas tem sido utilizadas para preparar o sinal amostrado para o processo de estimação modal, dentre elas, a eliminação das componentes contínuas do sinal, filtragem do sinal na frequência de interesse e a re-amostragem do sinal quando necessário (LEANDRO et al., 2015).

Como as dinâmicas dos modos eletromecânicos estão imersas nas variáveis da rede, deve-se definir inicialmente qual dessas grandezas será utilizada para estimação desses modos. O monitoramento realizado pelas μ PMU disponibilizam os fasores tanto da tensão e corrente (módulo e ângulo de fase), como da frequência. No entanto, os modos eletromecânicos acabam sendo mais observáveis em sinais de frequência e diferença angular da tensão entre as barras do sistema (LEANDRO et al., 2015). Os sinais ambiente da frequência serão utilizados nesta pesquisa. Quanto a localização das PMU's nos SEP, é usual a instalação das mesmas próximas aos geradores e barramentos de interesse (LEANDRO et al., 2015).

A determinação do tamanho de janela de dados adequada para operação ambiente do sistema é ponto preponderante na qualidade dos resultados da estimação. Tendo em mente que conceitualmente os métodos *mode meters* pressupõem janelas de dados teoricamente infinitas, isso na prática implica que a janela de dados não deve ser pequena (OVERSCHEE; MOOR, 1996).

Considerando a operação ambiente, com o sistema sujeito apenas as pequenas variações de carga, é possível considerar o sistema operando em uma condição de equilíbrio, ou quase estacionária, por um período suficiente para a utilização de métodos *mode meters*. Em contrapartida, os SEP não são sistemas estacionários, e em períodos muito longos o sistema pode começar a operar em um ponto diferente de equilíbrio, com a presença de dinâmicas eletromecânicas diferentes, prejudicando a qualidade das estimativas realizadas.

Com isso, é possível encontrar na literatura estudos com dados ambientes que apresentam a aplicação de janelas de dados de 10 à 20 minutos de duração (TRUDNOWSKI; PIERRE, 2009), (LEANDRO et al., 2015). Nesse período de tempo, podemos considerar o sistema dentro de um mesmo ponto de operação.

A eliminação das componentes DC presentes no sinal deve ser realizada, pois as variáveis dos sinais amostrados tendem a apresentar variação em torno do ponto de operação dessa variável. Por exemplo, os sinais de frequência, utilizados nesta pesquisa, apresentam variação em torno da frequência de operação do sistema que é 60Hz, quando é subtraída a média desse sinal de frequência, obtemos apenas as variações que estão ocorrendo no sistema em torno de um ponto médio zero, o que melhora a performance dos métodos de decomposição modal, pois melhora a relação entre sinal ruído dos dados da amostra (JINGMIN et al., 2011).

Em sistemas de GET os modos eletromecânicos encontram-se principalmente na faixa de 0.1Hz a 3Hz, todavia, em redes de distribuição essa faixa de frequência ainda não está bem definida. A presença de geradores com baixa inércia podem influenciar o aparecimento de modos eletromecânicos com frequência mais elevada, perto de 6Hz (KUIAVA et al., 2008).

A re-amostragem do sinal pode ser necessária, pois taxas de amostragem muito elevadas podem causar problemas numéricos e problemas de sensibilidade na conversão de polos discretos para polos contínuos. Além disso, a diminuição do número de amostras processadas também se reflete com a diminuição do tempo computacional (LEANDRO et al., 2015).

3.2 ETAPA DE PROCESSAMENTO

O processamento dos sinais tratados na seção anterior é realizado neste trabalho pelos métodos de decomposição modal N4SID e YW e serão descritos a seguir. Os principais parâmetros de entrada são a ordem do modelo e o tamanho da janela de dados. Esses são métodos paramétricos não-recursivos, ou seja, geram estimativas de modelos do sistema a partir do processamento de janelas de dados amostrados. Nesses métodos, não se faz necessário

conhecer as entradas que estimulam o sistema. Sendo assim, o modelo do sistema é estimado considerando os sinais amostrados como as saídas desses modelos estimados.

3.2.1 N4SID

O algoritmo N4SID é um método de identificação de sistemas baseada em subespaços de estados. A família de métodos baseadas em subespaço de estados apresentam a simplicidade e a robustez das técnicas matemáticas como principais vantagens, além disso, a representação do modelo estimado em espaços de estados se mostra apropriado para estudos de síntese de controladores do sistema (embora tais estudos não sejam o foco desse trabalho). Como as entradas do sistema não são conhecidas ou mensuráveis, está sendo utilizada a formulação estocástica do N4SID. Esse sistema na forma de espaço de estados estimados, escrito em tempo discreto invariante no tempo, se apresenta da seguinte forma (LEANDRO et al., 2014)

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Ke(k) \\ y(k) &= Cx(k) + e(k) \end{aligned} \quad (3.1)$$

sendo $k \in \mathbb{Z}$, $y \in \mathbb{R}^{n_0}$ o vetor de saídas com n_0 o número de saídas medidas, $x \in \mathbb{R}^n$ o vetor de estados, $e \in \mathbb{R}^{n_0}$ o vetor de ruído com média zero e matriz de covariância $R > 0$, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ a matriz de estados, $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ a matriz de saída e $K \in \mathbb{R}^{n \times n_0}$ o ganho do filtro Kalmam (LEANDRO et al., 2014), (OVERSCHEE; MOOR, 1996).

Considera-se n_0 conjunto de sinais amostrados, dadas por $y_{n_0}(k)$, $k = 0, 1, \dots, N + 2\kappa - 2$, sendo $\kappa > 0$ e N suficientemente grande. Com os dados amostrados são construídas duas matrizes, a matriz de bloco de Toeplitz:

$$\check{Y}_{0|\kappa-1} = \begin{bmatrix} y_1(\kappa-1) & y_1(\kappa) & \cdots & y_1(N+\kappa-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n_0}(\kappa-1) & y_{n_0}(\kappa) & \cdots & y_{n_0}(N+\kappa-2) \\ y_1(\kappa-2) & y_1(\kappa-1) & \cdots & y_1(N+\kappa-3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n_0}(\kappa-2) & y_{n_0}(\kappa-1) & \cdots & y_{n_0}(N+\kappa-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_1(0) & y_1(1) & \cdots & y_1(N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n_0}(0) & y_{n_0}(1) & \cdots & y_{n_0}(N-1) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{kp \times N} \quad (3.2)$$

e a matriz bloco de Hankel:

$$\check{Y}_{\kappa|2\kappa-1} = \begin{bmatrix} y_1(\kappa) & y_1(\kappa+1) & \cdots & y_1(N+\kappa-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n_0}(\kappa) & y_{n_0}(\kappa+1) & \cdots & y_{n_0}(N+\kappa-1) \\ y_1(\kappa+1) & y_1(\kappa+2) & \cdots & y_1(N+\kappa) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n_0}(\kappa+1) & y_{n_0}(\kappa+2) & \cdots & y_{n_0}(N+\kappa) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_1(2\kappa-1) & y_1(2\kappa) & \cdots & y_1(N+2\kappa-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n_0}(2\kappa-1) & y_{n_0}(2\kappa) & \cdots & y_{n_0}(N+2\kappa-2) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{kp \times N} \quad (3.3)$$

Tomando κ como o instante presente, define-se $Y_p = \check{Y}_{0|\kappa-1}$ e $Y_f = \check{Y}_{\kappa|2\kappa-1}$, sendo que os subscritos p e f remetem a saídas "passadas" e "futuras" respectivamente. Com essa notação, são definidas as matrizes de covariância da amostra de dados:

$$\frac{1}{N} \begin{bmatrix} Y_p \\ Y_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_p^T & Y_f^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{pp} & \Sigma_{pf} \\ \Sigma_{fp} & \Sigma_{ff} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Com base nas definições apresentadas, a formulação do algoritmo de identificação por subespaços de estados é descrita a seguir.

1. A partir da matriz de covariância Σ_{ff} e Σ_{pp} , são calculadas as matrizes raiz quadrada L e M ,

$$\Sigma_{ff} = LL^T \quad (3.5)$$

$$\Sigma_{pp} = MM^T \quad (3.6)$$

2. Calcula-se a decomposição em valores singulares da matriz de covariância Σ_{fp} normalizada.

$$L^{-1}\Sigma_{fp}M^{-T} = U\Sigma V^T \simeq \hat{U}\hat{\Sigma}\hat{V}^T \quad (3.7)$$

sendo que $\hat{\Sigma}$ é obtida desprezando os valores singulares suficientemente pequenos de Σ .

3. A matriz estendida de observabilidade pode ser definida como

$$\mathcal{O}_k = L\hat{U}\hat{\Sigma}^{1/2} \quad (3.8)$$

e a matriz estendida de controlabilidade como

$$\mathcal{C}_k = \widehat{\Sigma}^{1/2} \widehat{V}^T M^T \quad (3.9)$$

4. As estimativas das matrizes A , C e \overline{C} são calculadas abaixo:

$$A = \underline{\mathcal{O}}_k^\dagger \overline{\mathcal{O}}_k \quad (3.10)$$

sendo as matrizes $\underline{\mathcal{O}}_k$ e $\overline{\mathcal{O}}_k$ igual a matriz de observabilidade estendida sem a última das n_0 linhas, e sem a primeira das n_0 linhas respectivamente de e o sinal \dagger a notação de pseudoinversa da matriz.

$$C = \mathcal{O}_{kp} \quad (3.11)$$

$$\overline{C} = \mathcal{C}_{kp} \quad (3.12)$$

sendo \overline{C} igual a matriz de C sem a última das n_0 linhas.

5. Considera-se Λ_0 como uma matriz quadrada formada pelas p primeiras linhas e p primeiras colunas da matriz Σ_{ff} , assim pode-se calcular o ganho do filtro de Kalman como:

$$K = (\overline{C}^T - A \widehat{\Sigma} C^T)(\Lambda(0) - C \widehat{\Sigma} C^T)^{-1} \quad (3.13)$$

6. A partir dos i – ésimos pares complexos dos autovalores discretos da matriz de estado A estimada, representados por λ_i , pode-se calcular a frequência e o amortecimento, respectivamente, dos modos de oscilação.

$$f_i = \frac{\angle \lambda_i}{2\pi T} \quad (3.14)$$

$$\zeta_i = \frac{-\Re(\ln(\lambda_i))}{|\ln(\lambda_i)|} \quad (3.15)$$

sendo T o período de amostragem dos dados e $\angle \lambda_i$ a fase do i – ésimos autovalor.

3.2.2 Método Yule Walker

O algoritmo YW gera um modelo auto-regressivo (modelo AR) para representar o sistema (TRUDNOWSKI, 2008)(DOSIEK et al., 2013). Esse modelo pode ser representado em tempo discreto como:

$$\begin{aligned} \hat{y}_i(k) &= \sum_{j=1}^n a_j \hat{y}_i(k-j) \\ y_i(k) &= \hat{y}_i(k) + \mu_i(k) \end{aligned} \quad (3.16)$$

sendo que $y_i(k)$ é o sinal medido, μ_i é o ruído de medição, com $i = 1, 2, \dots, n_0$ e n_0 o número de sinais de saída medidos do modelo, k é o tempo discreto $\in \mathbb{Z}$, n é a ordem do sistema, a_j 's são os parâmetros (TRUDNOWSKI, 2008) (DOSIEK et al., 2013).

A auto correlação do sinal y_i é definida por:

$$r_i(q) = E\{y_i(k)y_i(k-q)\} \quad (3.17)$$

sendo $E\{\cdot\}$ o operador de expectativa, o qual calcula a média sobre os conjuntos de realizações, e q é o deslocamento inteiro de tempo discreto.

Considerando um número finito de N amostras podemos aproximar a auto correlação por:

$$r_i(q) \cong \frac{1}{N} \sum_{k=q+1}^N y(k)y(k-q) \quad (3.18)$$

Utilizando a análise realizada em (STOICA; MOSES, 1997), pode-se mostrar que a função de autocorrelação satisfaz:

$$r_i(q) = - \sum_{j=1}^n a_j r_i(q-j), \quad q > m \quad (3.19)$$

Podemos expandir a equação acima na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} r_i(m) & r_i(m-1) & \cdots & r_i(m-n+1) \\ r_i(m+1) & r_i(m) & \cdots & r_i(m-n+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_i(m+M-1) & r_i(m+M-2) & \cdots & r_i(m+M-n) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_i(m+1) \\ r_i(m+2) \\ \vdots \\ r_i(m+M) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

ou

$$R_i \underline{a} = -\underline{r}_i \quad (3.21)$$

Para cada saída, a equação 3.21 pode ser concatenada em um problema matricial dado por:

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_{n_0} \end{bmatrix} \underline{a} = - \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_{n_0} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Geralmente as equações 3.22 é sobre-determinada, com mais linhas do que colunas, dessa forma a solução resultante é tipicamente o melhor ajuste com relação aos mínimos quadrados.

Deve-se então calcular as raízes (z_j para $j = 1, \dots, n$) da equação característica obtida:

$$z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n = 0 \quad (3.23)$$

A partir das raízes da equação característica, também definidas por λ , podemos calcular os polos (ou modos) do modelo do sistema conforme as equações 3.14 e 3.15.

3.3 ETAPA DE PÓS-PROCESSAMENTO

A utilização dos métodos de decomposição modal empregados nesta pesquisa gera um modelo estimado do sistema. A técnica de diagrama de estabilização, utiliza esse modelo estimado para identificar os modos eletromecânicos com significado físico no sistema, principalmente, o modo dominante, que podem ser observáveis nos sinais medidos.

Os SEP tipicamente apresentam poucos modos eletromecânicos de baixa frequência. Porém, buscando melhorar o condicionamento numérico dos métodos de decomposição modal, e levando-se em consideração que a princípio não é conhecido a quantidade de modos eletromecânicos presentes no sistema, é usual a escolha de modelos com ordem elevada. A escolha da ordem do modelo também está atrelada ao método utilizado, geralmente para métodos baseados em dados ambientes essa ordem fica entre 15 e 25 (LEANDRO et al., 2015).

No entanto, a ordem do modelo determina o número de modos que serão estimados. O fato que o modelo calculado estima uma quantidade de modos maior em relação ao número que, de fato, existe no sistema ou que são observáveis nos sinais coletados, resulta no aparecimento de modos espúrios dentre o conjunto de modos estimados. Estes modos são assim chamados por estarem presentes na representação matemática do modelo estimado, porém não têm significado físico no sistema (LEANDRO et al., 2015). Conforme discutido em (WU et al., 2017), existem três causas principais para a existência de modos espúrios no processo de estimação modal: (i) sobre-estimação da ordem do modelo identificado; (ii) presença de ruído nos sinais utilizados para a identificação do modelo; (iii) aplicação de filtros na etapa de pré-processamento.

Nesse sentido, algumas propostas têm sido analisadas no intuito de classificar os modos eletromecânicos que realmente estão presentes no sistema, visto que, esses modos espúrios podem apresentar frequências e amortecimentos próximos aos modos físicos do sistema. Este fato dificulta a análise de estabilidade.

Uma forma de abordar o problema em SEP é através da energia dos modos de oscilação (*Oscillation Modes Energy*) (TRUDNOWSKI, 2008), que leva em conta que, na maioria dos casos, os modos eletromecânicos físicos apresentam uma maior energia que os modos espúrios.

No entanto, como os sinais ambientes são aleatórios, não é possível calcular diretamente a energia dos modos no domínio do tempo, assim estima-se a pseudo energia de um determinado

modo através da sua função de autocorrelação. Os modos são ordenados pela magnitude da sua pseudo energia e os que apresentarem maior energia são selecionados como modos eletromecânicos (TRUDNOWSKI, 2008).

Outra abordagem para o problema, utilizada em SEP, é através do índice de dominância modal (LEANDRO et al., 2015). Esta técnica ordena os modos dominantes do modelo pelo valor dos resíduos referente a cada pólo da função de transferência, conforme a equação abaixo.

$$\gamma_i \equiv \frac{-[R_i \lambda_i^* + R_i^* \lambda_i]}{2\lambda_i^* \lambda_i} \quad (3.24)$$

sendo γ_i o índice de dominância modal do i – ésimos modo, R_i o resíduo do i – ésimos modo, correspondente ao autovalor λ_i (LEANDRO et al., 2015).

Essa técnica leva em consideração as constantes de tempo de cada modo e considerando a localização dos zeros da função de transferência do modelo estimado é capaz de indicar quais polos são dominantes mesmo quando os modos não apresentam as maiores constantes de tempo (pólos mais próximos dos eixo imaginário) (PRIOSTE et al., 2011) do conjunto de polos estimados.

No entanto, uma limitação para as técnicas mencionadas acima é a necessidade de se definir previamente um valor de corte tanto para a pseudo energia como para o índice de dominância modal na classificação dos modos eletromecânicos, já que em sistemas reais esses valores podem variar bastante.

Uma terceira alternativa para a classificação dos modos eletromecânicos está na técnica de diagrama de estabilização. Ainda pouco utilizada em SEP, sendo o trabalho de (JINGMIN et al., 2011) o único encontrado na literatura, esta técnica é largamente utilizada na identificação de modos oscilatórios em estruturas mecânicas. Essa técnica leva em consideração o fato que a frequência e amortecimento dos modos eletromecânicos apresentam pouca sensibilidade com a ordem do modelo estimado.

A técnica de diagrama de estabilização tem apresentado bons resultados na identificação de modos oscilatórios, com significado físico em sistemas mecânicos (MRABET et al., 2014) (AUWERAER; PEETERS, 2004). Com a vantagem de uma apresentação gráfica de fácil entendimento, o que justifica a escolha desta técnica neste trabalho, tratando um problema análogo em SEP. Para tanto, são propostas algumas adaptações aos diagramas de estabilização tradicionais para atender as peculiaridades da análise de modos eletromecânicos em SEP e que serão tratadas na sequência.

A similaridade entre a solução de problemas relacionados com dinâmicas oscilatórias entre estruturas mecânicas e SEP tem enriquecido o debate (THAMBIRAJAH, 2010) (JINGMIN et al., 2011). Porém algumas características inerentes a cada um dos sistemas (elétricos e mecânicos), devem ser levadas em consideração para se adaptar as técnicas a nova realidade.

Podemos destacar ainda, como exemplo (AUWERAER; PEETERS, 2004), que utiliza o diagrama de estabilização para discriminar modos espúrios na análise da vibração e comportamento acústico de estruturas mecânicas. Ou ainda, (MRABET et al., 2014), que utiliza a técnica aplicada a análise de estruturas de aeronaves, onde o autor propõem um novo critério de estabilização dos modos oscilatórios. Devido a quantidade de modos oscilatórios em estruturas mecânicas ser muito elevada (podendo ser superior a 100 modos oscilatórios) esse novo critério compara os autovetores de todos os modos estimados para eliminar modos espúrios que possam surgir próximos dos modos físicos.

O Fluxograma 4 apresenta os principais passos do diagrama de estabilização proposto. Cada etapa será descrita a seguir, sendo que o diagrama de estabilização proposto utiliza os dados provenientes do diagrama de estabilização convencional.

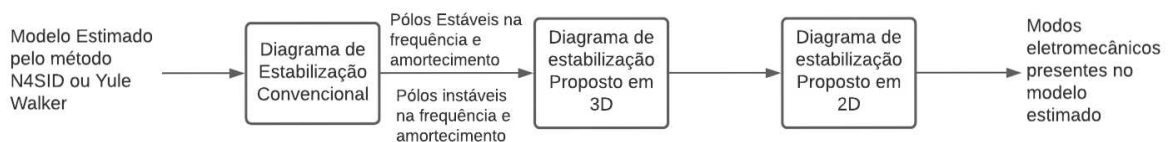


FIGURA 4 – Fluxograma Proposta de Diagrama de estabilização

3.3.1 Diagrama de Estabilização Convencional

O diagrama de estabilização é uma técnica desenvolvida para identificar os modos oscilatórios que apresentem significado físico, distinguindo-os dos modos espúrios. Como os modos oscilatórios com significado físico apresentam pouca variação de frequência e amortecimento em relação a ordem do modelo, esse procedimento é realizado comparando os modos estimados (frequência e amortecimento) para modelos de diferentes ordens (AUWERAER; PEETERS, 2004) (MRABET et al., 2014).

O diagrama de estabilização convencional é um gráfico em que a frequência dos modos oscilatórios é representada no eixo das abscissas, enquanto que, a ordem do modelo é representada no eixo das ordenadas. Devido a dificuldade de determinar a ordem do modelo, inicialmente deve-se escolher um valor de ordem n , sendo n suficientemente alto. Então, dois caminhos são possíveis: a) aplica-se um processo de identificação de sistemas para se obter vários modelos de ordens diferentes (n , $n - 1$, $n - 2$, $n - 3$, e assim por diante). b) aplica-se um processo de identificação de sistemas para o modelo de ordem n e, na sequência, uma técnica de redução de ordem do modelo para se gerar os modelos de ordem gradativamente inferiores.

Na pesquisa descrita neste documento, foi utilizado o caminho (b), isto é, aplicar uma técnica de redução de ordem no modelo de ordem n estimado.

Então, um critério de similaridade dos modos oscilatórios é adotado de forma que seja possível classificar os modos espúrios resultantes da presença de ruído e redundância do modelo. O critério de similaridade definido a seguir é baseado na comparação dos polos correspondentes a modelos de ordens adjacentes (MRABET et al., 2014). Então eles são apresentados no diagrama com diferentes símbolos quando eles satisfazem a:

$$\left| \frac{f_n - f_{(n+1)}}{f_n} \right| \leq f_c \quad (3.25)$$

$$\left| \frac{\xi_n - \xi_{(n+1)}}{\xi_n} \right| \leq \xi_c \quad (3.26)$$

sendo f_n e $f_{(n+1)}$ a frequência dos modos para ordens subjacentes, ξ_n e $\xi_{(n+1)}$ o amortecimento dos modos para ordens subjacentes. f_c e ξ_c são a tolerância máxima da frequência e amortecimento respectivamente, para que o modo seja considerado estável na frequência e amortecimento, ou seja, tenha significado físico.

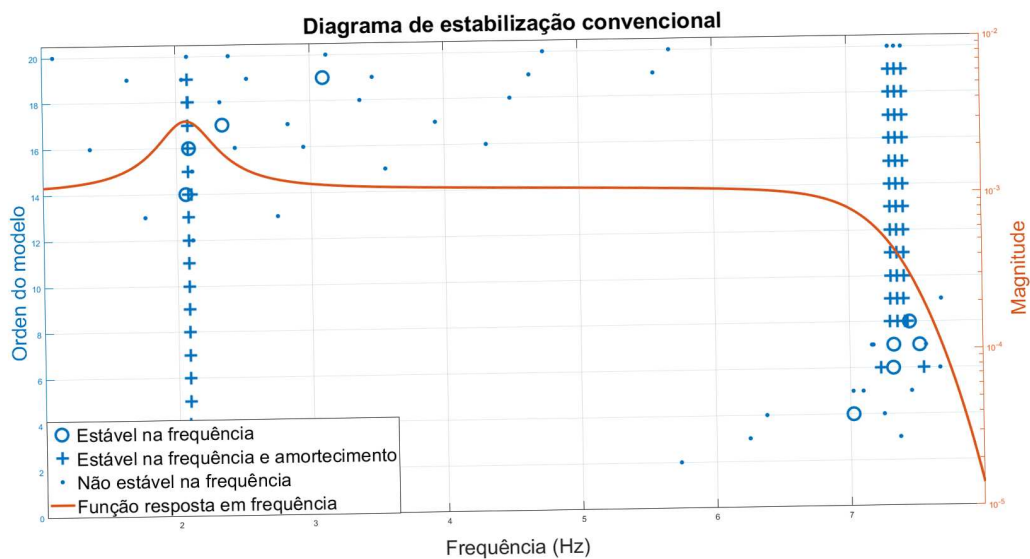


FIGURA 5 – Diagrama de estabilização Convencional

A Figura 5 apresenta um exemplo de diagrama de estabilização convencional construído a partir de um modelo de ordem máxima igual a 20, estimado do sistema teste 1 utilizado neste trabalho. utilizando a segunda estratégia apresentada para gerar os modelos de diferentes ordens. Com o intuito apenas de evidenciar as características do diagrama de estabilização. Nessa figura, os modos oscilatórios que atenderam os critérios de frequência e amortecimento para todas as ordens de modelo (ou seja, o modo de frequência um pouco superior a 2Hz), equações (3.25) e (3.26) respectivamente, são ditos estáveis na frequência e amortecimento, representados pelo sinal +, esses são interpretados como modos eletromecânicos do sistema. Os modos que atenderam apenas o critério da frequência, estáveis na frequência, representados por um o, ou apenas o critério de amortecimento, não estáveis na frequência, representados por um

, são representados nos diagramas de estabilização convencional, mas não trazem informações relevantes para a análise em SEP. Também é apresentada a função resposta em frequência do modelo estimado, com sua magnitude indicada no lado direito do eixo das abcissas.

3.3.2 Diagrama de Estabilização 3D

Em estruturas mecânicas, por exemplo, apesar de apresentar uma quantidade grande de modos oscilatórios, esses geralmente são bem amortecidos, assim a preocupação maior dos diagramas de estabilização convencionais está em identificar a frequência de tais modos. Dessa forma, apesar de levar em consideração o amortecimento dos modos como critério de classificação dos modos físicos, o diagrama de estabilização utilizado para problemas em estruturas mecânicas não traz informações sobre o amortecimento desses modos oscilatórios, conforme ilustrado pela Figura 5.

Já em SEP, temos um número menor de modos eletromecânicos, e o amortecimento desses modos são um ótimo indicativo da estabilidade do sistema, tendo em vista que algumas condições de operação do sistema podem deteriorar o amortecimento dos modos eletromecânicos a ponto de levar o sistema a instabilidade.

Dessa forma, este trabalho propõe uma adaptação do diagrama de estabilização à realidade de SEP, incluindo o amortecimento na apresentação gráfica. O diagrama de estabilização 3D proposto é construído utilizando as informações, frequência e amortecimento, dos modos oscilatórios para todas as ordens dos modelos estimados pelo diagrama de estabilização convencional. Tal diagrama é implementado no software Matlab com uma função específica para gerar diagramas de estabilização, chamada `modalsd`.

O diagrama de estabilização proposto é apresentado na forma de histograma com a frequência e o amortecimento dos modos representados no eixo x e eixo y respectivamente, sendo o eixo vertical z referentes a incidência dos modos. Assim os modos com pouca variação de frequência e do amortecimento irão apresentar maior incidência nas células do histograma. Quanto maior o número de modos incidentes em uma célula, significa um maior número de modos que atenderam o critério de frequência e amortecimento ao longo dos modelos de diferentes ordens obtidos, indicando a presença de um modo eletromecânico, o que fica evidenciado pelo tamanho das barras do histograma, conforme será ilustrado mais adiante.

A escolha da quantidade de células para a faixa de frequência e amortecimento foi definida buscando facilitar a análise gráfica. Com quantidades menores de células no histograma, o tamanho das células fica maior, diminuindo a precisão da incidência dos modos estáveis na frequência e amortecimento, trazendo incerteza quanto aos valores de frequência e amortecimento dos modos eletromecânicos. Já uma quantidade maior de células no histograma, diminui o tamanho dessas células, o que aumenta a precisão dos modos estáveis, porém pode tornar a análise gráfica mais difícil quando da incidência de modos estáveis na fronteira das células, pois dividindo a incidência entre células vizinhas tal modo eletromecânico terá sua

intensidade dividida entre essas células.

O histograma é implementado para uma faixa de frequência de 1 a 8Hz, sendo uma faixa de frequência mais ampla da que seria utilizado em sistemas de GET, pela possibilidade de redes de distribuição apresentarem modos com frequência mais elevada. No entanto, a faixa de frequência pode ser alterada de acordo com o interesse de cada pesquisa. Para o amortecimento é considerado que modos com amortecimento superior a 20% são suficientemente amortecidos para serem desprezados na análise, assim, foi definido uma faixa de valores para o amortecimento de 0 à 20%.

Além da altura da célula para indicar a incidência de polos estáveis, é utilizada uma escala de cores quentes, sendo o preto uma célula sem nenhuma incidência e quanto mais claro o topo da coluna da célula tem-se uma maior incidência de modos estáveis. Essa escala de cores pode facilitar a comparação de células distantes no histograma, mas se torna mais relevante na etapa seguinte que será apresentada.

A Figura 6 é um exemplo de diagrama de estabilização 3D, gerado a partir dos modos estáveis em frequência e amortecimento do diagrama de estabilização convencional, Figura 5, apresentada anteriormente. O tamanho e as cores mais claras indicam uma maior incidência de polos estáveis da frequência e amortecimento nas determinadas células. Comparando o diagrama de estabilização 3D com o diagrama de estabilização convencional, é possível perceber que a frequência das células que apontam a presença de polos estáveis correspondem a frequência dos polos estáveis em frequência e amortecimento, porém, no diagrama de estabilização 3D é possível observar o amortecimento desses polos estáveis, o que é de grande interesse para SEP.

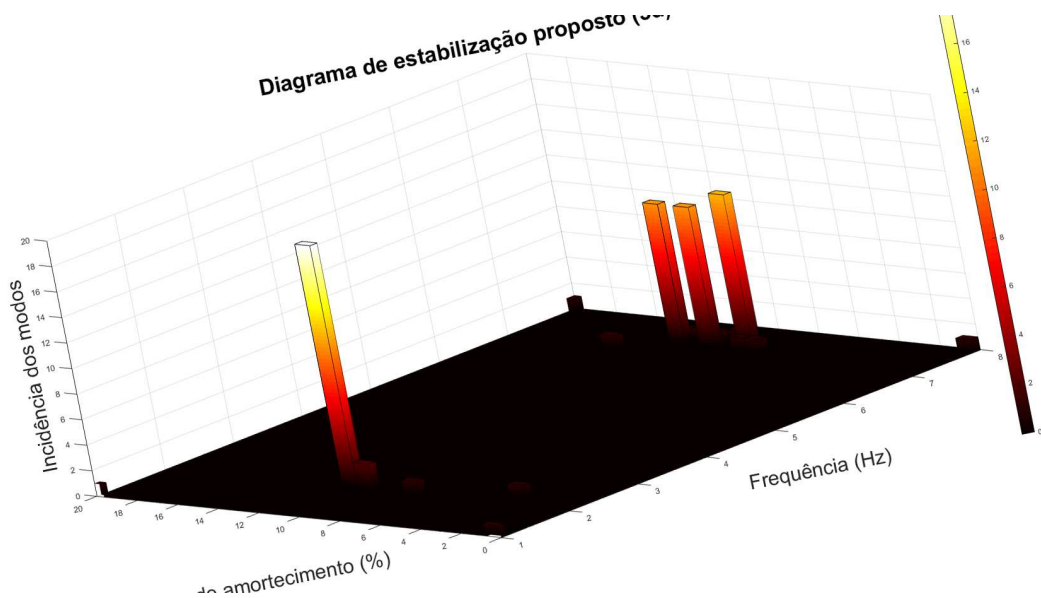


FIGURA 6 – Diagrama de estabilização 3D

3.3.3 Diagrama de Estabilização 2D

Buscando tornar mais prática a análise, também é proposto um diagrama de estabilização em 2D, obtido pela vista superior do diagrama de estabilização em 3D. O fato do diagrama de estabilização 3D estar em perspectiva pode "esconder" a incidência de polos estáveis e dificultar sua análise. Assim, esta apresentação alternativa é empregada para facilitar a análise da incidência de polos em células próximas entre si e tornando mais fácil a determinação dos valores de frequência e amortecimento.

Na apresentação em 2D a frequência e o amortecimento dos modos são representados pelo eixo x e eixo y respectivamente. Com a vista superior, a incidência dos modos eletromecânicos é indicada pela escala de cores da mesma forma que o caso anterior, sendo uma célula preta indicação da ausência de polos estáveis e quanto mais clara a cor maior a incidência de polos estáveis.

Na figura 7 é apresentado um exemplo de diagrama de estabilização 2D, gerado pela vista superior do diagrama de estabilização 3D da etapa anterior, Figura 6. Pode-se perceber que a célula com maior incidência no exemplo 3D é representada pela célula mais clara no exemplo 2D. Além disso, as três células com polos estáveis, com frequência mais elevadas do exemplo 3D, tem representação laranja no exemplo 2D, indicando uma menor incidência.

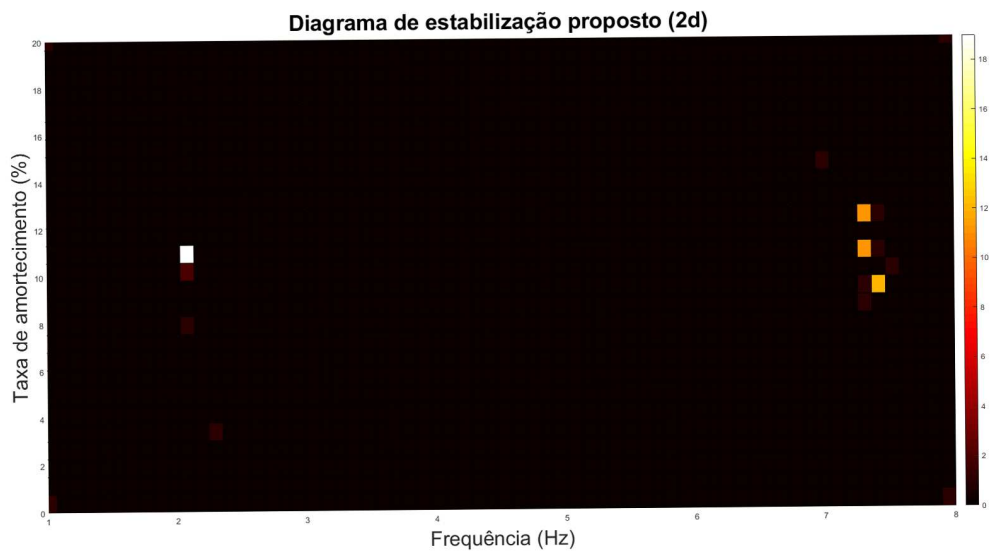


FIGURA 7 – Diagrama de estabilização 2D

Destaca-se ainda na Figura 7, que os modos espúrios se espalham por diferentes células, indicando uma baixa incidência (cor escura). A conclusão que se tira desta figura é de que existe um modo eletromecânico com frequência em torno de 2Hz e taxa de amortecimento em torno de 11%. Como este modo é estável na frequência e amortecimento para todos os modelos de diferentes ordens (diagrama de estabilização convencional), ele deve ser o modo dominante no sinal utilizado no processo de estimação modal. Enquanto isso, uma incidência

menor (em laranja) de modos na frequência entre 7 e 8Hz pode indicar a presença de um segundo modo eletromecânico, com uma observabilidade mais baixa no sinal, o que remete a um certo espalhamento em diferentes células próximas entre si. Ou ainda, tais modos podem ser simplesmente espúrios, e associados a etapa de filtragem, pelo fato da frequência estar próxima da frequência de corte, como será discutido no próximo capítulo.

4 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os testes e resultados para os dados ambientes simulados pelos dois sistemas testes de redes de distribuição com GD. Em seguida serão apresentados testes realizados para dados ambientes coletados por μ PMUs localizadas na UFPR

Os testes para os sistemas testes 1 e 2 serão apresentados seguindo uma mesma sequência de informações. Primeiro é feita uma descrição de suas características de operação e são apresentados os parâmetros de linhas e cargas. Em seguida são apresentados os parâmetros necessários para a simulação dinâmica da operação ambiente. Por último, são apresentados os resultados dos dois métodos de decomposição modal, N4SID e Yule Walker, junto com a técnica de diagrama de estabilização para três cenários propostos.

O primeiro cenário busca investigar o efeito da aleatoriedade da carga na estimação dos modos eletromecânicos. Para tanto, 30 simulações dinâmicas são realizadas, tendo cada uma delas uma variação randômica distinta de 10% das principais cargas do sistema. Com isso, têm-se 30 respostas ambientes distintas para cada sistema teste. Cada um desses 30 conjuntos de dados ambientes é processado e os diagramas de estabilização são produzidos com a sobreposição dos resultados de cada um desses conjuntos. Assim sendo, a partir deste cenário é possível avaliar o quanto a aleatoriedade da carga influencia no processo de estimação e identificação do modo eletromecânico dominante.

O segundo cenário busca investigar o efeito do ruído de medição nos sinais amostrados na estimação dos modos eletromecânicos. Para tanto, é adicionado um ruído branco com potência de 10 dB em um conjunto de dados ambientes do cenário 1 e realizada a estimação modal junto com a técnica de diagrama de estabilização. Esse processo é repetido 30 vezes, sempre adicionando um ruído branco diferente, mas com a mesma potência, ao mesmo conjunto de dados ambientes. Os resultados são apresentados com a sobreposição das 30 estimativas obtidas para o conjunto de dados ambientes com ruído branco distinto.

O terceiro cenário investiga o efeito da aleatoriedade da carga e do ruído de medição juntos. Para tanto, é adicionado um ruído branco com potência de 10 dB em cada um dos 30 conjuntos de dados ambientes do cenário 1. Cada conjunto de dados ambientes com adição de ruído gera uma estimativa. Os resultados desse cenário são obtidos sobrepondo cada umas dessas estimativas obtidas.

4.1 SISTEMA TESTE 1

O primeiro sistema teste representa uma rede de distribuição real localizada no interior do estado de São Paulo, conforme mostrado na Figura 8. A rede de distribuição é interligada

ao sistema de transmissão nacional através da conexão com um sistema de sub transmissão de 138kV, através de um transformador de três enrolamentos de 138/11,5/13,8 kV conectado em $Y/\Delta/Y_g$. A rede de distribuição é composta por 32 barras, 5 transformadores, 4 turbo-geradores e 27 ramos que totalizam 51 Km de linhas de distribuição. Todas as barras operam com um nível de tensão de 13,8 kV, com exceção da barra 603, que está conectada a um transformador que abaixa o nível de tensão da barra para 2,4 kV (ABREU, 2005).

Os quatro turbo-geradores estão conectados nas barras 601, 602 (duas unidades) e 603, próximos as cargas mais relevantes do sistema. Para o caso base, é considerado uma potência total de geração de 10,66 MW e 0,29 MVar, além de cargas que somadas consomem 10,48 MW e 2,51 MVar.

Os sinais amostrados de frequência utilizados para a estimação modal foram coletados nas barras 601, 602 e 603, junto ao barramento onde estão presentes os geradores síncronos da rede de distribuição. Esses sinais amostrados da simulação dos sistema teste representam os sinais coletados por μ PMU, sendo usual a escolha de barramentos perto da geração síncrona de interesse (LEANDRO et al., 2015).

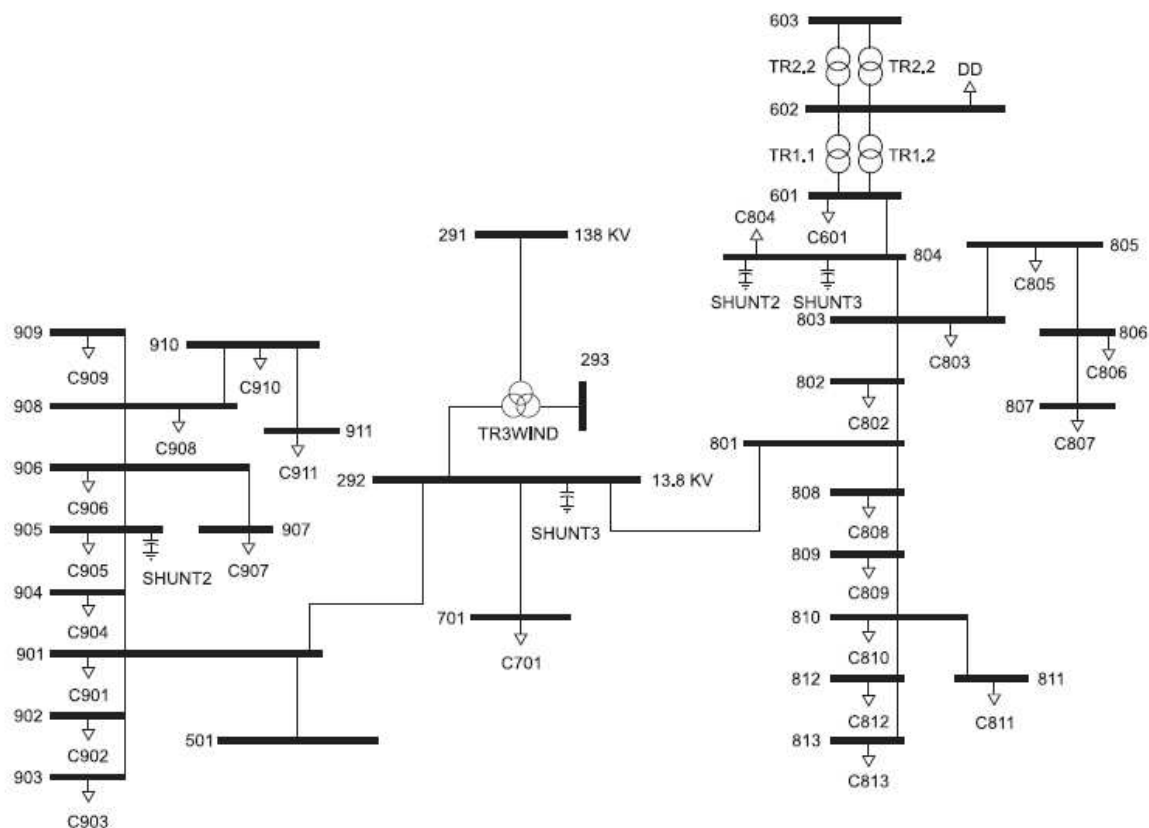


FIGURA 8 – Diagrama unifilar da rede de distribuição localizada no interior do Estado de São Paulo. Sistema teste 1

Fonte: – (ABREU, 2005)

4.1.1 Dados do sistema teste: parâmetros de linha e condição operativa

A determinação do ponto de operação do sistema teste 1, utiliza o modelo estático da rede e é realizada pelo programa ANAREDE, onde se calcula o fluxo de potência para um caso base, gerando um relatório utilizado na etapa seguinte de simulação dinâmica.

Para tanto, seguem nas Tabelas ?? e ?? as informações da condição operativa em regime permanente e os dados dos parâmetros de linha da rede de distribuição.

TABELA 1 – Dados de barra sistema teste 1

Barra	V (pu)	Ângulo (graus)	Tipo	Geradores		Carga		Shunt
				P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)
291	1,000	0,0	V θ					
292	0,983	1,1	PQ					1,2
293	0,987	0,8	PQ					
501	0,979	0,9	PQ					
601	1.004	7,3	PV	1,5		5,5	0	
602	1,000	9,2	PV	8,5		0	0,2	
603	1.000	9,6	PV	3,5				
701	0,982	1,1	PQ			1,9	0,866	
801	0,983	1,1	PQ					
802	0,987	2,9	PQ			0,013	0,006	
803	0,993	5,0	PQ			0,022	0,01	
804	1,004	7,3	PQ			1,248	0,569	1,5
805	0,989	5,2	PQ					
806	0,987	5,4	PQ			0,04	0,18	
807	0,985	5,4	PQ			0,052	0,024	
808	0,981	1,0	PQ			0,056	0,026	
809	0,981	1,0	PQ			0,111	0,051	
810	0,981	1,0	PQ			0,103	0,047	
811	0,980	1,0	PQ			0,067	0,031	
812	0,981	1,0	PQ			0,028	0,013	
813	0,981	1,0	PQ					
901	0,979	0,9	PQ			0,121	0,059	
902	0,979	0,8	PQ			0,057	0,028	
903	0,979	0,8	PQ					
904	0,979	0,8	PQ			0,105	0,051	
905	0,976	0,7	PQ			0,59	0,286	0,3
906	0,976	0,7	PQ			0,158	0,077	
907	0,976	0,7	PQ					
908	0,976	0,7	PQ			0,076	0,037	
909	0,975	0,7	PQ			0,094	0,046	
910	0,974	0,7	PQ			0,1	0,048	
911	0,974	0,7	PQ					

Fonte: – (ABREU, 2005)

TABELA 2 – Dados de linha sistema teste 1

DE	Para	Elemento	R (%)	X(%)
291	292	Transformador	0,000	9,890
292	293	Transformador	0,000	5,700
291	293	Transformador	0,000	17,40
292	701	Linha	0,250	0,520
292	901	Linha	1,750	3,640
292	801	Linha	0,010	0,0208
901	501	Linha	0,0193	0,0250
901	902	Linha	3,650	7,592
901	904	Linha	0,330	0,6864
902	903	Linha	4,400	9,1529
904	905	Linha	2,0075	1,5125
905	906	Linha	0,3796	0,3497
906	907	Linha	2,1900	2,0175
906	908	Linha	0,8760	0,8070
908	909	Linha	11,919	3,9192
908	910	Linha	14,766	4,8576
910	911	Linha	75,510	24,840
801	802	Linha	2,000	4,160
802	803	Linha	2,300	4,784
803	804	Linha	2,650	5,512
804	601	Linha	0,000	0,001
803	805	Linha	26,848	8,832
805	806	Linha	14,514	4,775
806	807	Linha	29,784	9,798
801	808	Linha	2,300	4,775
808	809	Linha	0,250	0,520
809	810	Linha	1,550	3,225
810	811	Linha	5,070	2,560
810	812	Linha	1,000	2,080
812	813	Linha	4,500	0,940
601	602	Transformador	0,000	5,650
601	602	Transformador	0,000	5,650
602	603	Transformador	0,000	3,960
602	603	Transformador	0,000	3,960

TABELA 3 – Dados de linha sistema teste 1

Fonte: – (ABREU, 2005)

4.1.2 Simulação da operação ambiente

O Anatem é um programa para análise de transitórios eletromecânicos e é utilizado nesta pesquisa para simular a operação ambiente do sistema teste. A análise não linear, depende no entanto de modelos dinâmicos dos geradores e de suas malhas de controle que são apresentados no Anexo A. Sendo a subestação que faz a conexão do sistema de transmissão

representada por um barramento infinito.

Os dados ambientes são gerados a partir de uma variação aleatória de 10% da potência ativa da carga total das barras 601, 701, 802 e 803 em destaque vermelho na tabela ???. Essa variação aleatória de carga é governada por um gerador de números pseudo aleatórios implementados no Anatem através de um CDU (Controlador Definido pelo Usuário), sendo o algoritmo do gerador de números pseudo aleatórios apresentado no Anexo C (PRIOSTE et al., 2011).

O comportamento da operação ambiente simulada com um passo de integração de 0,01 segundos pode ser observada, por exemplo, no sinal amostrado da frequência da barra 602, conforme Figura 9, onde a componente contínua do sinal já foi retirada. Nesta mesma figura, tem-se também o sinal amostrado após o processo de filtragem, que é utilizado pelos métodos de decomposição modal.

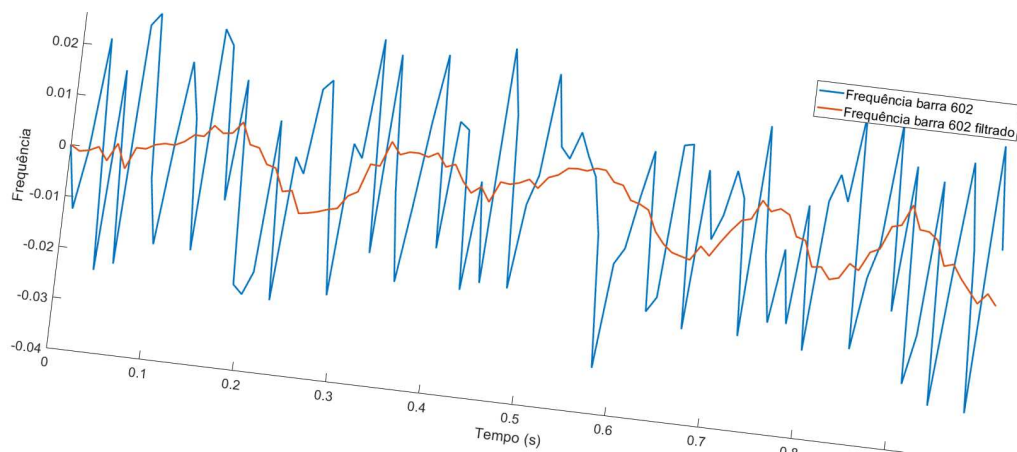


FIGURA 9 – Sinal de frequência da barra 602

4.1.3 Análise linearizada via Pacdyn

O programa Pacdyn executa uma análise linear do sistema para o estudo de oscilações estimuladas por pequenas perturbações. Como os modos eletromecânicos são características intrínsecas ao modelo, não se faz necessidade da presença de nenhum tipo de perturbação para se extrair as suas informações principais.

Os modos eletromecânicos são calculados pelo programa Pacdyn a partir dos autovalores da matriz A do modelo linearizado, com base na leitura dos cartões de entrada do sistema utilizado no Anatem.

A tabela 7 contém os modos eletromecânicos calculados pelo Pacdyn.

TABELA 4 – Modos eletromecânicos via modelo conceitual sistema teste 1.

Modo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
1	2,09	11,22
2	4,10	11,11
3	4,56	11,39
4	5,09	11,77

Fonte: – do Autor(2020)

Como pode ser notado, o sistema teste 1 apresenta 4 modos eletromecânicos, sendo um deles de frequência próxima a 2Hz e outros três com frequência superior a 4Hz. Todos eles possuem taxa de amortecimento superior a 10%. Conforme discutido no artigo (KUIAVA et al., 2008), o modo de frequência 2Hz é um modo global da rede de distribuição com GD, ou seja, é um modo que se manifesta em todos os geradores da rede e, portanto, é o modo dominante. Os demais modos estão associados a um subconjunto de geradores e, por isso, possuem frequência mais elevada. Destaca-se, portanto que o objetivo principal da aplicação do procedimento de estimação modal, é o de identificar o modo dominante de frequência 2Hz em detrimento aos modos espúrios.

4.1.4 Resultados

A coleta de dados através da simulação do sistema teste em operação ambiente representa os dados coletados pelas μ PMU. Esses dados ambientes, pré-processados, são usados como as variáveis de saída (que compõem o vetor $y(t)$) para o modelo estimado pelos algoritmos N4SID e YW. Foram utilizados modelos de ordem 20 para ambos os métodos de decomposição modal, além de um período de amostragem de 0,01s, igual ao passo de integração utilizado na simulação realizada no Anatem. Está sendo utilizado o método N4SID em sua versão multi-sinais, com três sinais de entrada, e o método YW na versão mono-sinal, tendo em vista que sua versão multi-sinais não apresentou resultados satisfatórios.

A técnica de diagrama de estabilização utiliza o modelo calculado pelos métodos N4SID e YW com ordem máxima, através da ferramenta próprio no software Matlab, obtendo assim modelos com diferentes ordens para que seus polos possam ser comparados.

Os resultados apresentados analisam os modos estimados para os três cenários descritos anteriormente neste mesmo capítulo, lembrando que o primeiro investiga o efeito da variação aleatória de carga no sistema, o segundo analisa o efeito da presença de ruído de medição no sinal e o terceiro investiga o efeito da variação de carga no sistema e a presença de ruído de medição nos sinais amostrados.

Para os três cenários foram aplicadas janelas de dados de 1, 5, 10, 15 e 20 minutos. No entanto, para não sobrecarregar o texto principal, são apresentados a seguir apenas os resultados para as janelas de dados de 5, 10 e 20 minutos. Os resultados obtidos para janelas

de 1 e 15 minutos são apresentadas no Anexo. Os resultados para cada um dos métodos de decomposição modal utilizados são apresentados em sequência, para cada um dos cenários.

Os resultados, para janelas de dados de 20 minutos, são apresentados em uma figura composta de 4 gráficos, com o intuito de estabelecer um comparativo entre o diagrama de estabilização convencional e os diagramas de estabilização propostos (em 3D e 2D) e trazendo ainda como base comparativa os modos estimados via modelo conceitual obtido pelo software PacDyn. Sendo os gráficos ordenados em *a*, *b*, *c* e *d*. O gráfico *a* é formado pelo diagrama de estabilização 3D, o gráfico *b* é formado pelo diagrama de estabilização 2D, o gráfico *c* é formado pelo diagrama de estabilização convencional, e o gráfico *d* traz os modos eletromecânicos obtidos via modelo conceitual com o objetivo de validar as estimativas obtidas nos diagramas de estabilização.

Para não apresentar gráficos repetitivos e facilitar a análise e comparação entre os métodos, os resultados para janelas de dados de 5 e 10 são formados apenas pelos gráficos *a* e *b* referentes aos diagramas de estabilização em 3D e 2D respectivamente.

4.1.4.1 Cenário 1

Para análise do efeito da variação aleatória de carga na estimação e classificação dos modos eletromecânicos físicos, são utilizados 30 conjuntos de dados ambientes estimulados por variações distintas de carga. As estimativas encontradas para os 30 conjuntos de dados ambientes são sobrepostas para formar os resultados apresentados a seguir.

O primeiro resultado apresentado foi obtido com o método YW com uma janela de dados de 20 minutos, Figura 10. Observando os gráficos *a* e *b* com os diagramas de estabilização propostos, pode-se notar dois conjuntos de células do histograma com maior incidência de polos, uma de frequência próxima a 2Hz e amortecimento entre 11 e 12%, a outra célula de frequência 7,4Hz e amortecimento entre 12 e 13%. Pelo diagrama de estabilização convencional tem-se a presença de polos estáveis na frequência e amortecimento de frequência próximas a 2 e 7,4Hz.

Analisando os gráficos *b* e *d* da Figura 10, é possível comparar a frequência e amortecimento do modo global de frequência de 2,09Hz e amortecimento 11,22%, (gráfico *d*), com as células de frequência próxima a 2Hz, (gráfico *b*). Assim, observa-se que o diagrama de estabilização proposto cumpriu com o objetivo principal que é determinar o modo dominante do sistema. Por outro lado, é preciso investigar o segundo conjunto de células de frequência de 7,4Hz. Tal conjunto não apresenta modo comparável aos obtidos via modelo conceitual, (gráfico *d*). Por estar próximo a frequência de corte do filtro utilizado (no caso 8Hz), pode ser resultado do processo de filtragem da etapa de pré-processamento. Uma análise mais detalhada da relação dos modos com frequência próxima a frequência de corte do filtro utilizado no processo de filtragem é apresentada no ANEXO D.

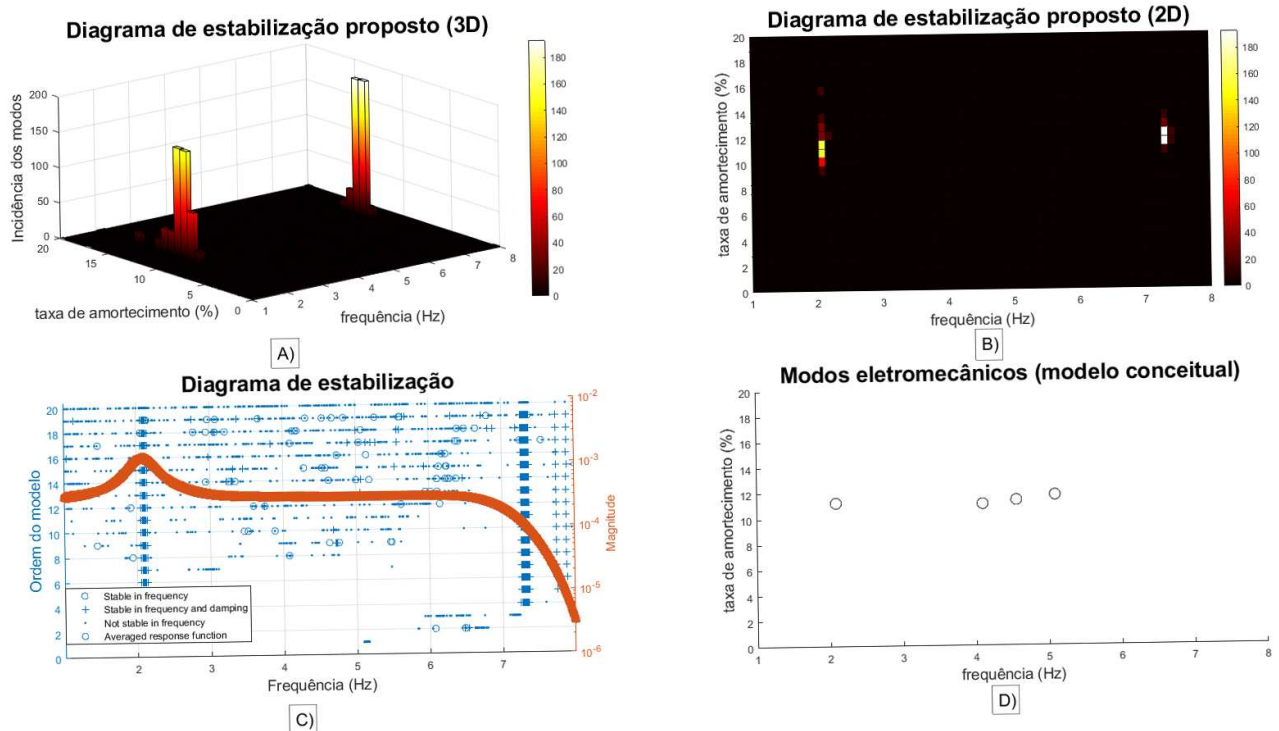


FIGURA 10 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 20 minuto de janela de dados.

A Figura 11 apresenta o resultado de aplicação do método N4SID para uma janela de dados de 20 minutos. Os diagramas propostos, gráfico *a* e *b*, apresentaram um conjunto de células com maior incidência de frequência próxima a 2Hz e amortecimento entre 11 e 12%, além de um conjunto de células com menor incidência em torno de 7,5Hz. O diagrama convencional, gráfico *c*, apresenta uma maior concentração de polos estáveis na frequência e amortecimento perto de 2Hz.

Através da comparação com o gráfico *d*, conclui-se que os diagramas propostos identificaram um modo eletromecânico de frequência e amortecimento próximo ao modo global da rede de distribuição. O conjunto de células de frequência mais elevadas pode ser considerado como modos espúrios pela sua baixa incidência e pela localização próxima a frequência de corte do filtro, análise ANEXO D.

A figura 12 apresenta a análise para o método YW com uma janela de dados de 10 minutos. Dos dois grupos de células com maior incidência, o primeiro conjunto de frequência próxima a 2Hz e amortecimento espalhados em três células entre 10 e 12%, com incidência de cerca de 100 polos cada célula, o segundo conjunto em torno de uma célula de maior incidência localizada em 7,3Hz e amortecimento de 11%.

Considerando a análise apresentada no ANEXO D, pode-se considerar o segundo conjunto de células como modos espúrios, resultado do processo de filtragem do sinal. Já o primeiro conjunto apresenta as células alinhadas na mesma frequência, o que é um indício da presença de um modo eletromecânico, enquanto que o amortecimento, apesar de certo

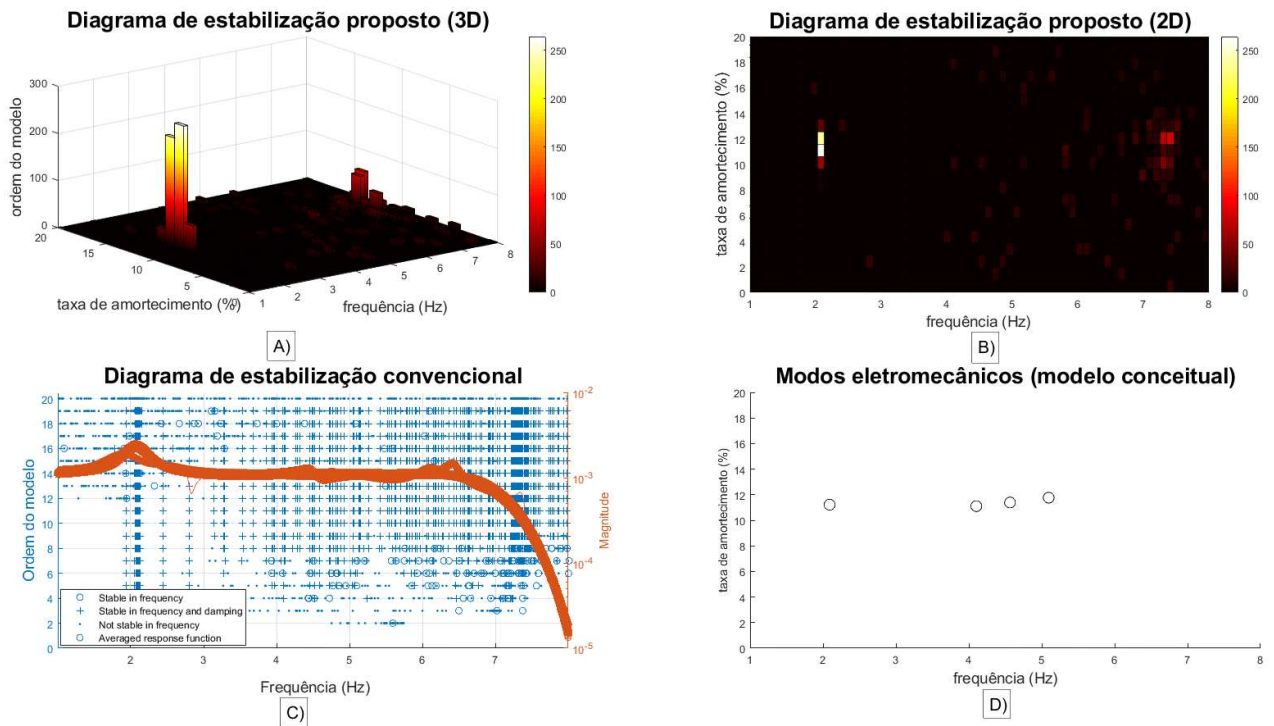


FIGURA 11 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 20 minuto de janela de dados.

espalhamento, fica em torno do valor de 11% esperado pela a análise via modelo conceitual.

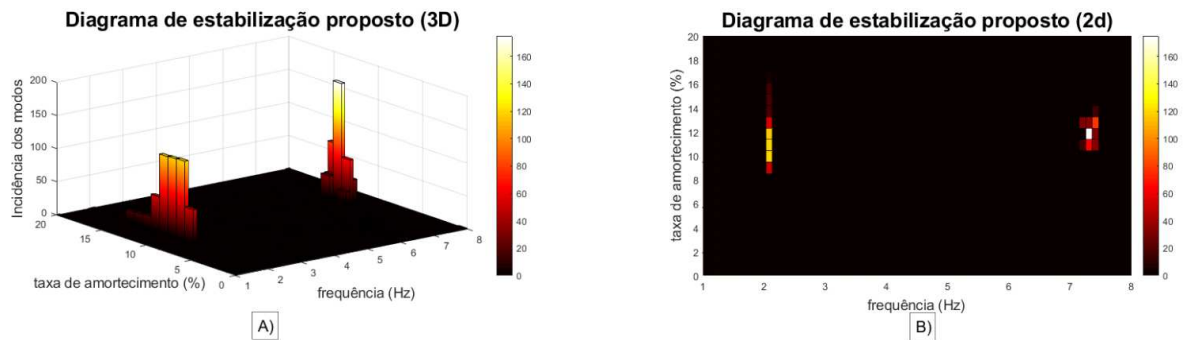


FIGURA 12 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 10 minuto de janela de dados.

O resultado do método N4SID para uma janela de 10 minutos é apresentado na Figura 13. Nos diagrama propostos, duas células com incidência de mais de 150 polos cada se destacam com frequência próxima a 2Hz e amortecimento entre 11 e 12%. Um segundo agrupamento de células, com menor incidência e frequência mais elevada, em torno de 7,3Hz também é observado.

As células com grande incidência, frequência próxima a 2Hz, são indicativo da presença de um modo eletromecânico na região, essas células tem amortecimento de 11 e 12%, que é comparável, em frequência e amortecimento, ao modo global de 2,09Hz obtido via modelo

conceitual. Pela baixa incidência e proximidade com a frequência de corte do filtro, o segundo conjunto de células pode ser considerado como modos espúrios.

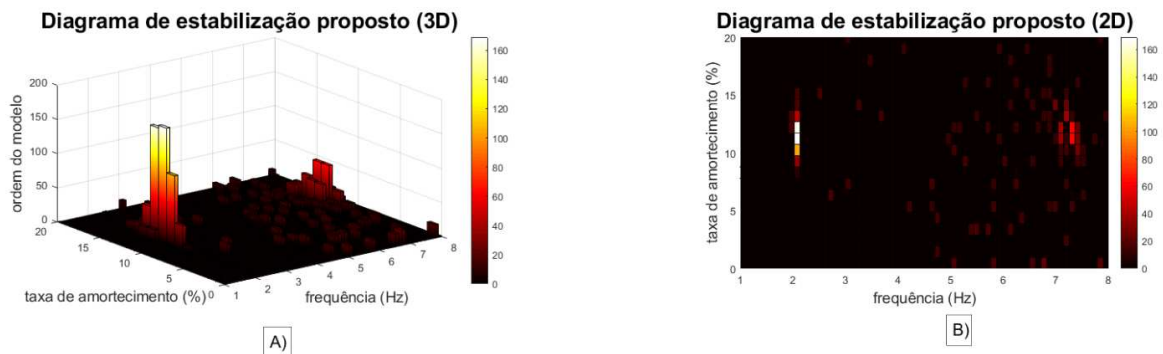


FIGURA 13 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 10 minuto de janela de dados.

Na Figura 14, tem-se o resultado do método YW com uma janela de dados de 5 minutos. As estimativas dos gráficos *a* e *b* apresentam dois conjuntos de células, o primeiro grupo com um espalhamento menor na frequência do que no amortecimento, uma célula com a incidência de mais de 80 polos se destaca nesse conjunto, com frequência e amortecimento localizados em 2,1Hz e 11% respectivamente. O segundo grupo tem espalhamento na frequência e amortecimento em torno da célula localizada em 7,4Hz e 12%.

Pela análise realizada no ANEXO D, consideramos os polos com incidência próxima a frequência de corte como modos espúrios. Com relação ao primeiro grupo de células, apesar do espalhamento nos polos incidentes na frequência e amortecimento, a presença de uma célula com grande número de polos em relação aos demais pode ser o indicativo da presença de um modo eletromecânico na região. Ainda, a célula com frequência de 2,1Hz e amortecimento de 11% é comparável ao modo global obtido via modelo conceitual.

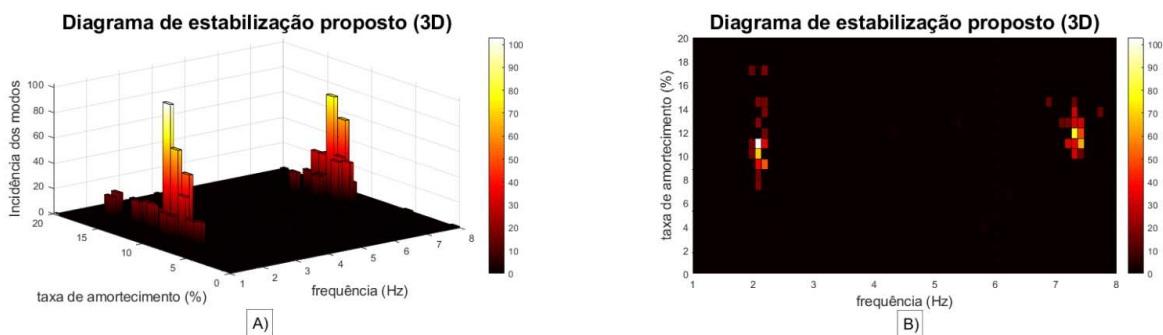


FIGURA 14 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 5 minuto de janela de dados.

Utilizando a mesma janela de dados de 5 minutos do caso anterior, temos na Figura 15, o resultado para o método N4SID. Os gráficos apresentam três células com maior incidência de polos de frequência próxima a 2,1Hz, uma com mais de 100 polos com amortecimento de

13% e outras duas com mais de 150 polos em sua região de amortecimento de 11 e 12%. As demais células apresentam uma incidência mais fraca de polos e espalhadas por todo o diagrama.

Através dos diagramas da Figura 15, conclui-se que o método N4SID estimou um modo eletromecânico de frequência próximo a 2,1Hz e amortecimentos entre 11 e 12%, não sendo possível indicar com melhor precisão o amortecimento de modo pois as referidas células apresentam uma mesma incidência de polos. Os demais modos são considerados modos espúrios pela sua baixa incidência.

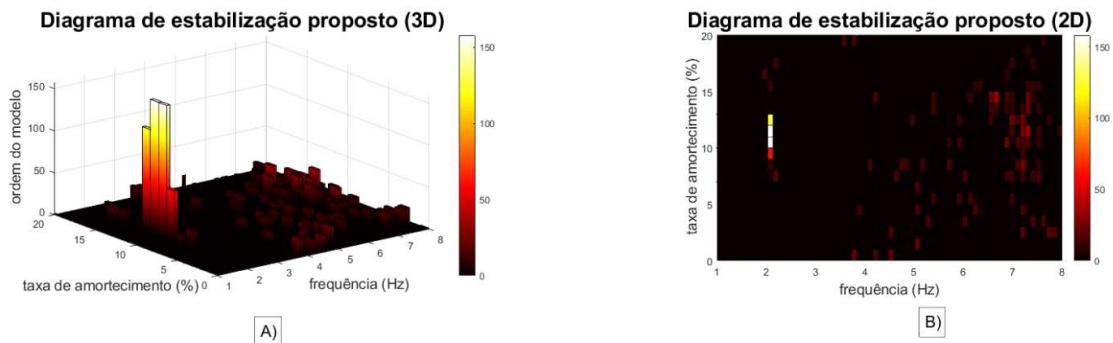


FIGURA 15 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 5 minuto de janela de dados.

Este primeiro cenário investigou o efeito da variação aleatória de carga no processo de estimação modal. De forma geral ambos os métodos estimaram um modo eletromecânico de frequência próxima a 2,1Hz e com amortecimento entre 10 e 12%, comparável ao modo global obtido via modelo conceitual de frequência 2,09Hz e amortecimento 11.22%. Porém, o método N4SID apresentou resultados mais claros de forma geral, com uma incidência mais concentrada de polos próxima ao modo global de interesse. Além disso, o método YW se mostrou mais sensível a modos espúrios associados ao processo de filtragem do sinal.

4.1.4.2 Cenário 2

Neste segundo cenário, é analisado o efeito do ruído de medição na estimação e classificação dos modos eletromecânicos. Para isso o diagrama de estabilização foi montado sobrepondo 30 modelos estimados pelos métodos YW e N4SID. Em cada modelo foi utilizado o mesmo conjunto de dados ambientes, porém, com a adição de um ruído branco diferente para cada sinal utilizado na estimação dos modelos.

Mantendo a mesma sequência de resultados utilizada no cenário anterior, iniciamos a apresentação do segundo cenário, do primeiro sistema teste, com o resultado obtido pelo método YW para uma janela de dados de 20 minutos, Figura 16. Percebe-se nos gráficos *a* e *b* duas células com grande incidência de polos. A primeira célula com frequência próxima a 2,1Hz e amortecimento 10% e uma segunda célula com frequência próxima a 7,4Hz com amortecimento próximo a 11%. Analisando o diagrama de estabilização convencional, (gráfico

c), nota-se um pico na magnitude da função resposta em frequência próximo a 2Hz, sobre o conjunto de polos estáveis na frequência e amortecimento. Já sobre o conjunto de polos estáveis na frequência e amortecimento próximo a 7,4Hz, verifica-se um declínio da magnitude da função resposta em frequência.

A partir dessa análise e comparando com o gráfico *d*, pode-se concluir que devido a grande incidência de polos na célula de frequência próximo a 2,1Hz e amortecimento 11% o método YW estimou um modo comparável em frequência e amortecimento com o modo de frequência de 2,09Hz obtido via modelo conceitual. O modo de frequência próximo a 7,4Hz não apresenta correspondência no gráfico *d* e como sua localização está próximo da frequência de corte, pode ser um modo espúrio resultado do processo de filtragem do sinal, conforme análise apresentada no ANEXO D.

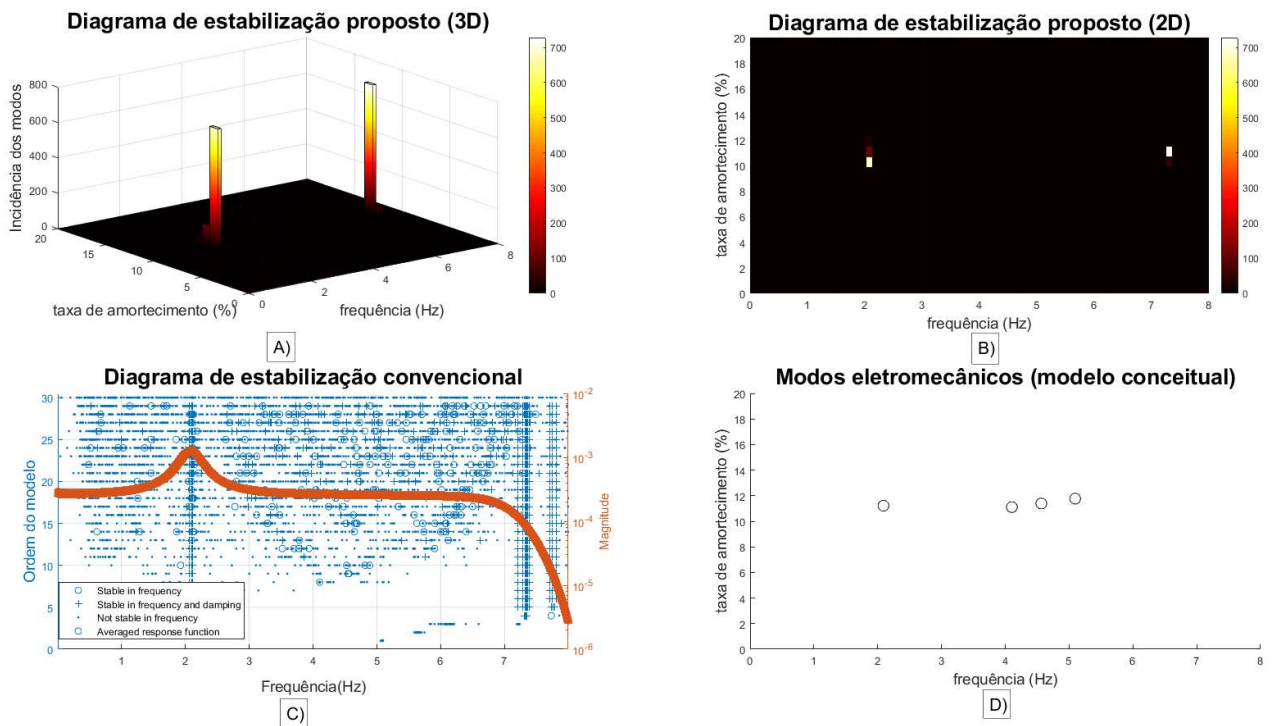


FIGURA 16 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 20 minuto de janela de dados.

A Figura 17 apresenta os resultados do método N4SID para uma janela de dados de 20 minutos. Os gráficos *a* e *b* apresentam um conjunto de células com maior intensidade de frequência próxima a 2Hz e amortecimento entre 10 e 12% com uma célula central a esse conjunto com amortecimento de 11% e um segundo agrupamento de células de menor incidência (em vermelho) de frequência entre 5,5 e 6 Hz e amortecimento entre 14 e 19%. Com o gráfico *c* é possível perceber um pico da magnitude da função resposta em frequência em 2 Hz e sua atenuação a partir de 5Hz, além de uma concentração de polos estáveis na frequência e amortecimento na frequência de 2Hz.

Pode-se concluir pela pequena incidência dos polos e seu espalhamento, que o segundo

grupo de células, com frequência mais elevada, se tratam de modos espúrios. Para o primeiro grupo de células, a presença mais intensa de polos na célula de frequência de 2,1Hz e amortecimento de 11% indica a estimação de um modo eletromecânico nessa região. Além disso, o modo estimado tem frequência e amortecimento comparável ao modo global obtido via modelo conceitual, (gráfico *d*).

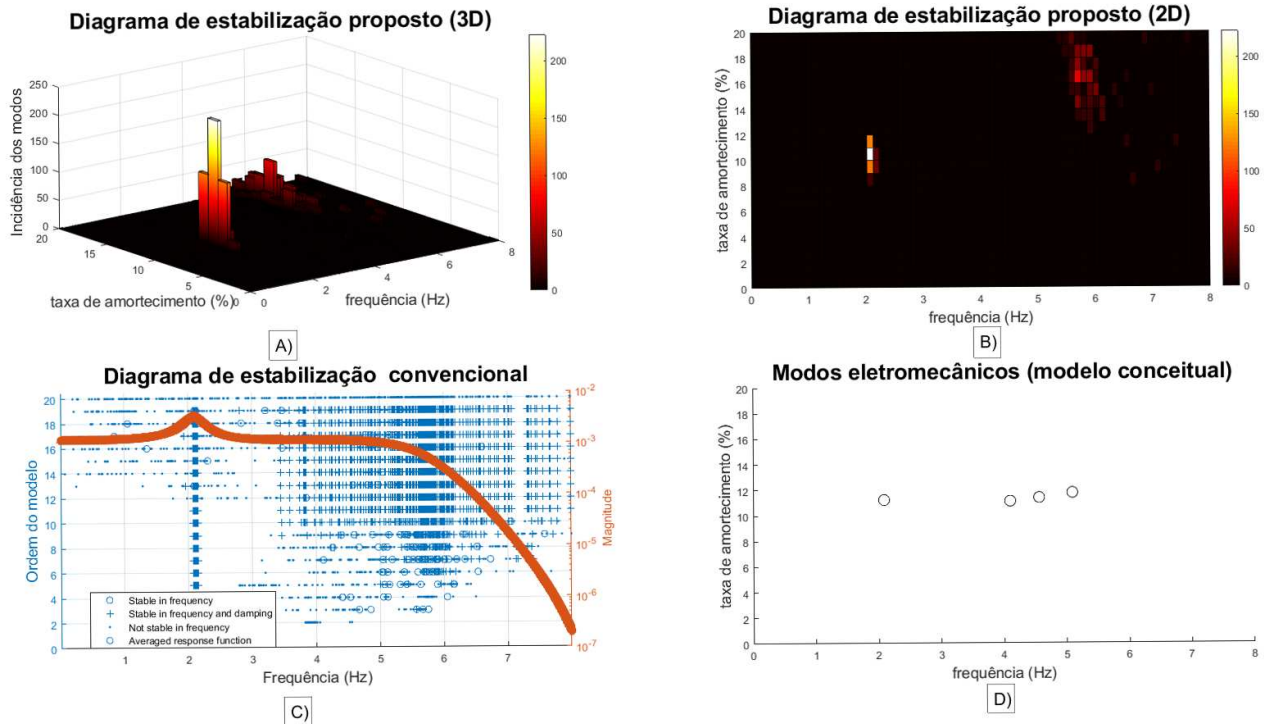


FIGURA 17 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 20 minuto de janela de dados.

Na sequência temos o resultado do método YW utilizando uma janela de dados de 10 minutos, conforme Figura 80. Os gráficos *a* e *b* apresentam dois conjuntos de células, o primeiro de frequência próxima a 2,1Hz e com amortecimento entre 10 e 11% com maior incidência na célula com 11% de amortecimento, e o segundo agrupamento de frequências entre 5,5 e 6Hz e amortecimento entre 18 e 20%.

Com base na Figura 80 descrita, pode-se concluir pela maior incidência de polos, que foi estimado um modo eletromecânico com frequência e amortecimento comparável ao modo de 2,09Hz obtido via modelo conceitual do gráfico *d*, já o segundo agrupamento não apresenta correspondente na análise do modelo conceitual, podendo ser desconsiderado pela sua taxa de amortecimento elevada.

O resultado para uma janela de dados de 10 minutos do método N4SID é apresentado na Figura 19. Os diagramas *a* e *b* apresentam um agrupamento de frequência próxima a 2,1Hz e com espalhamento no amortecimento entre as células de 9 a 12%, com uma célula se destacando com maior incidência em 11% e células de menor intensidade e maior espalhamento entre as frequências de 5,5 e 6Hz e amortecimento entre 12 e 20%.

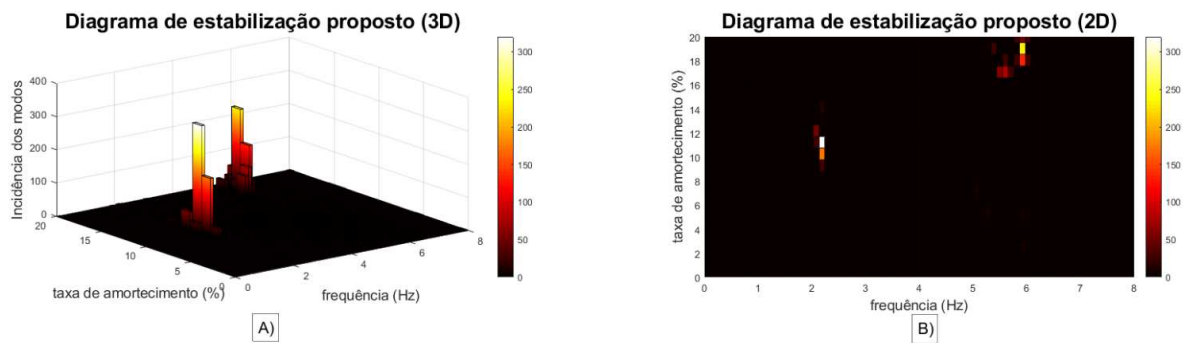


FIGURA 18 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 10 minuto de janela de dados.

Com a análise da incidência das células nos gráficos *a* e *b*, pode-se concluir a célula de maior incidência está representando um modo eletromecânico estimado de frequência próxima a 2,1Hz comparável em frequência e amortecimento com o modo de frequência de 2,09Hz obtido via modelo conceitual, ainda, pode-se considerar as células de frequência mais elevadas, entre 5,5 e 6Hz, como modos espúrios, devido a sua baixa incidência e espalhamento.

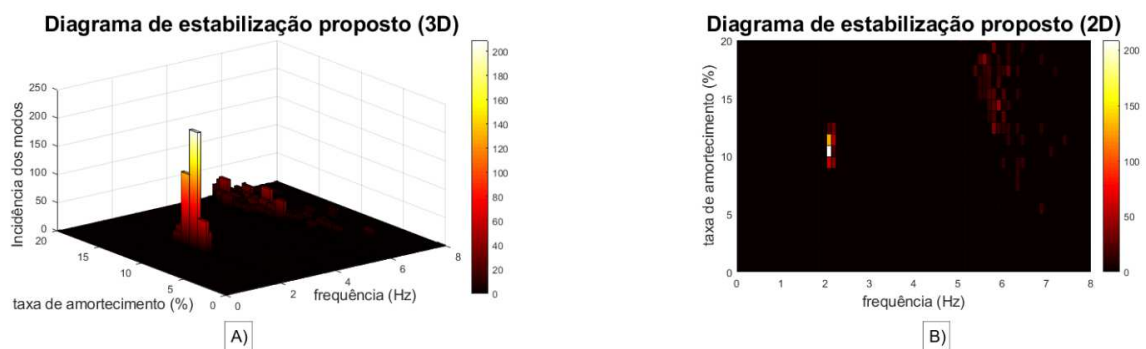


FIGURA 19 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 10 minuto de janela de dados.

Prosseguindo os resultados para janelas de dados de 5 minutos, a Figura 20 apresenta os diagramas propostos, gráfico *a* e *b* do método YW. Os gráficos apresentam dois grupos de células. O primeiro com células mais concentradas em frequência próxima a 2,1Hz e amortecimento entre 9 e 11%, com maior intensidade na célula de 10%, e um segundo grupo de menor intensidade com maior espalhamento tanto na frequência, entre 5 e 6Hz, como no amortecimento, quanto no amortecimento, entre 15 e 20%.

Pode-se assim concluir, a partir da Figura 20 que o método YW estimou um modo de frequência próxima a 2,1Hz pela maior incidência de polos nessa faixa de frequência, considerando a célula de maior incidência com amortecimento de 10% é possível estabelecer comparação, na frequência com o modo de 2,09Hz obtido via modelo conceitual, apesar do amortecimento do modo estimado ficar um pouco abaixo dos 11,22% do caso base. O segundo agrupamento pode ser considerado como modo espúrio devido ao seu espalhamento e baixa

intensidade.

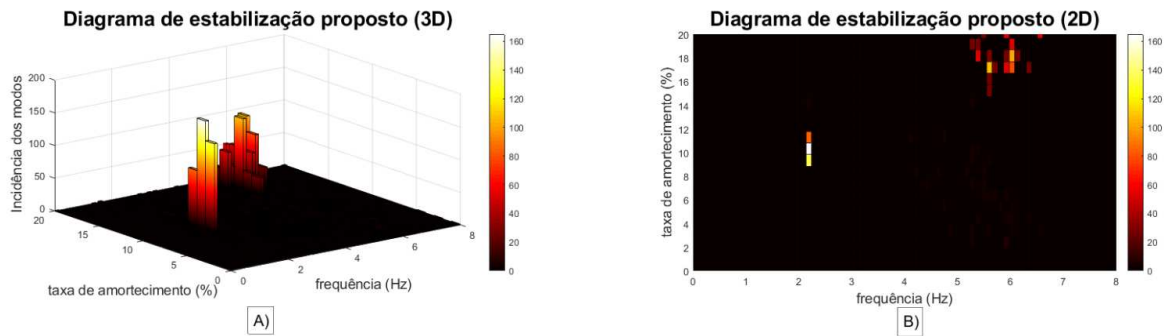


FIGURA 20 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 5 minuto de janela de dados.

A Figura 21 apresenta os resultados do método N4SID para uma janela de dados de 5 minutos. Os gráficos *a* e *b* apresentam um agrupamento com maior incidência de frequência próxima a 2Hz e com espalhamento no amortecimento entre as células de 8 a 14%, com duas células se destacando com maior incidência entre 9 e 10% e células de menor intensidade e maior espalhamento entre as frequências de 5,5 e 6,5Hz e amortecimento entre 8 e 20%.

Com a análise dos diagramas apresentados na Figura 21, pode-se concluir a célula de maior incidência indica um modo eletromecânico de frequência próxima a 2,1Hz, e amortecimento de 10%, sendo comparável em frequência e amortecimento com o modo de frequência de 2,09Hz obtido via modelo conceitual. Já as células de frequência mais elevadas podem ser consideradas modos espúrios devido a sua baixa intensidade e grande espalhamento.

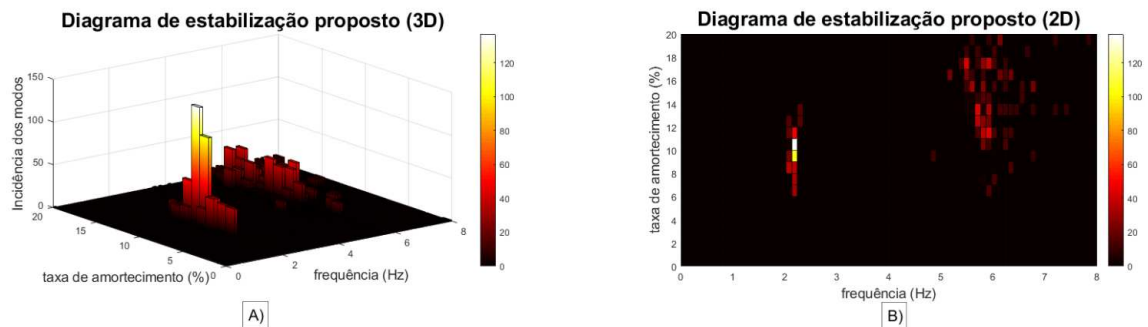


FIGURA 21 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 5 minuto de janela de dados.

Pode-se observar, neste segundo cenário com dados de 20 minutos o método YW apresentou menor espalhamento de polos estimados, apesar da presença de polos de frequência 7,4Hz na estimativa, resultado do processo de filtragem. Com dados de 10 minutos ambos os métodos indicaram de forma correta a presença do modo global, apresentando pouco espalhamento em torno da célula de maior incidência. Para a terceira janela de dados apresentada, 5 minutos, ambos os métodos conseguem indicar a presença do modo global da rede, mas

o método YW apresentou uma maior concentração de polos em torno da célula de maior incidência.

Pode-se notar que a presença de ruído de medição acarretou no aparecimento de polos com menor incidência, considerados espúrios, espalhados pelos diagramas. De forma geral nesse segundo cenário o método YW apresentou melhor desempenho na indicação do modo global, apesar da presença de modos espúrios em frequências mais elevadas.

4.1.4.3 Cenário 3

Para o terceiro cenário é analisado tanto a influência da aleatoriedade da carga como a presença de ruído no sinal medido. Para tanto, é acrescentado um ruído branco para cada um dos 30 conjuntos de dados utilizados no cenário 1. Com isso, os sistemas serão analisados com as diferentes variações de carga que estimulam diferentes respostas ambiente do sistema com a presença de ruído de medição.

Dando início a análise do terceiro cenário do sistema teste 1, tem-se na Figura 22 o resultado para o método YW com uma janela de dados de 20 minutos. Através dos gráficos *a* e *b* percebe-se dois conjuntos de células com grande incidência de polos. O primeiro conjunto de células com frequência próxima a 2,1Hz e amortecimento entre 11 e 12% e um segundo conjunto de células, com maior incidência de polos, com frequência próxima a 7,4Hz com amortecimento entre 11 e 12%.

A partir dessa análise dos diagramas propostos, conclui-se que o primeiro grupo de células de frequência de 2,1Hz e amortecimento de 11% indica a presença de um modo eletromecânico comparável em frequência e amortecimento com o modo de frequência de 2,09Hz obtido via modelo conceitual. Já o modo de frequência próximo a 7,4Hz não apresenta correspondente no gráfico *d* e como sua localização está próximo da frequência de corte, esse pode estar vinculado do processo de filtragem do sinal, conforme análise do ANEXO D.

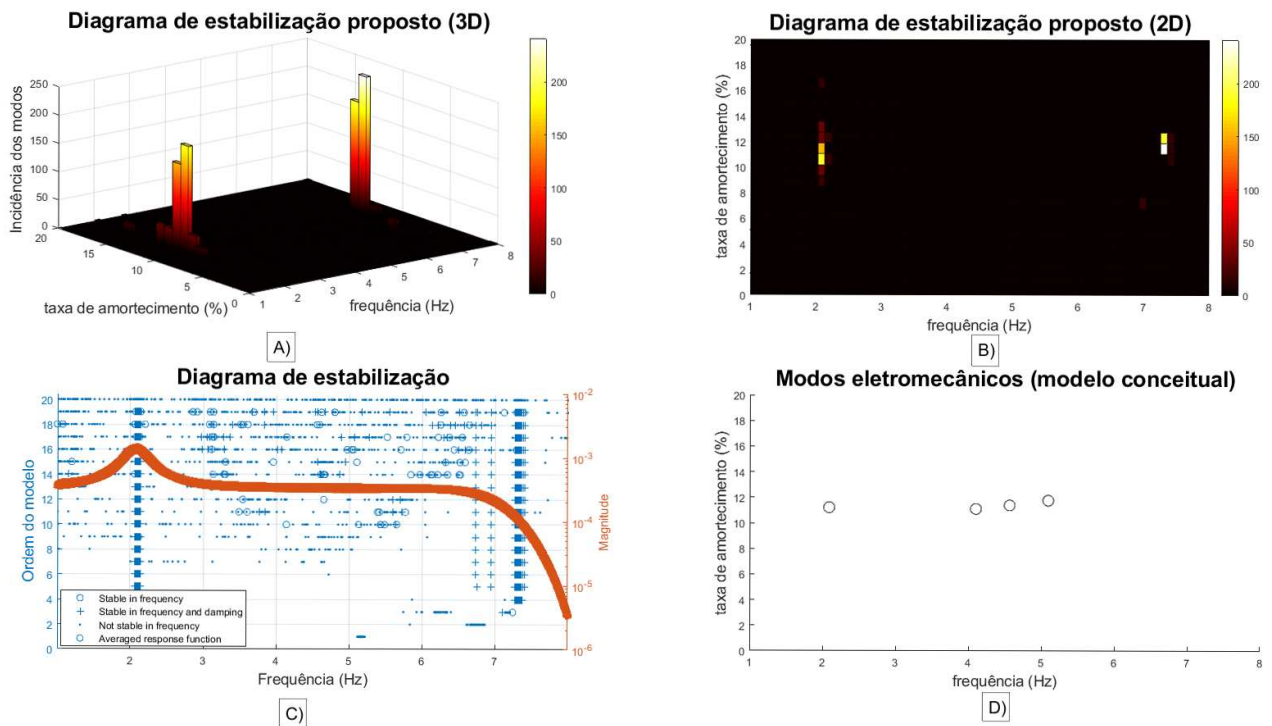


FIGURA 22 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 20 minuto de janela de dados.

A Figura 23 apresenta os resultados do método N4SID para uma janela de dados de 20 minutos. Pode-se notar que os gráficos *a* e *b* apresentam um conjunto de células com maior intensidade de frequência próxima a 2,1Hz e amortecimento entre 8 e 13% mas com uma célula de maior incidência em 11% e um segundo agrupamento de células de frequência entre 7 e 7,5 Hz e amortecimento entre 9 e 14%.

Pode-se concluir que o primeiro grupo de células indica a presença de um modo eletromecânico de frequência próxima a 2,1Hz e apesar de certo espalhamento dos polos no amortecimento desse modo, a célula de maior incidência corresponde ao amortecimento de 11% que é comparável ao modo global de 2,09Hz obtido via modelo conceitual. O segundo grupo, de frequência próxima entre 7 e 7,5Hz pode ser considerado com modos espúrios, pelo seu espalhamento na frequência e amortecimento nas células, podendo estar relacionado ao processo de filtragem pela sua proximidade com a frequência de corte.

O resultado do método YW para uma janela de dados de 10 minutos é apresentado na Figura 24. Os gráficos *a* e *b* apresentam dois conjuntos de células. O primeiro de frequência próxima a 2,1Hz e com amortecimento entre 9 e 14% com maior incidência de polos na célula com 12% de amortecimento. O segundo agrupamento apresenta uma maior incidência de polos de frequências próximas a 7,5Hz e amortecimento entre 10 e 15%.

Com base nos resultados apresentados na Figura 24, pode-se concluir que o método YW indica a presença de um modo eletromecânico com frequência de 2,1Hz e amortecimento de 12% um pouco superior ao modo de 2,09Hz obtido via modelo conceitual. Já o segundo

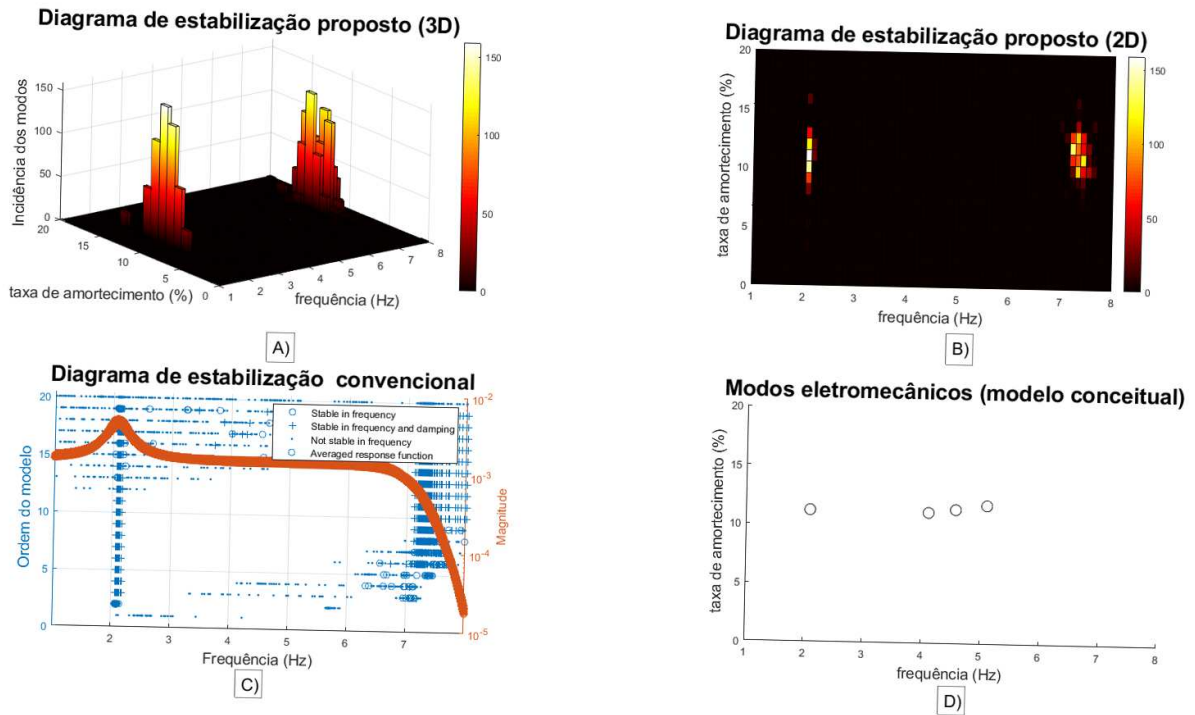


FIGURA 23 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 20 minuto de janela de dados.

agrupamento com frequência próxima a 7,5Hz, não apresenta correspondente comparável no gráfico *d* e, devido a sua proximidade com a frequência de corte do filtro utilizado pode ser resultado do processo de filtragem do sinal.

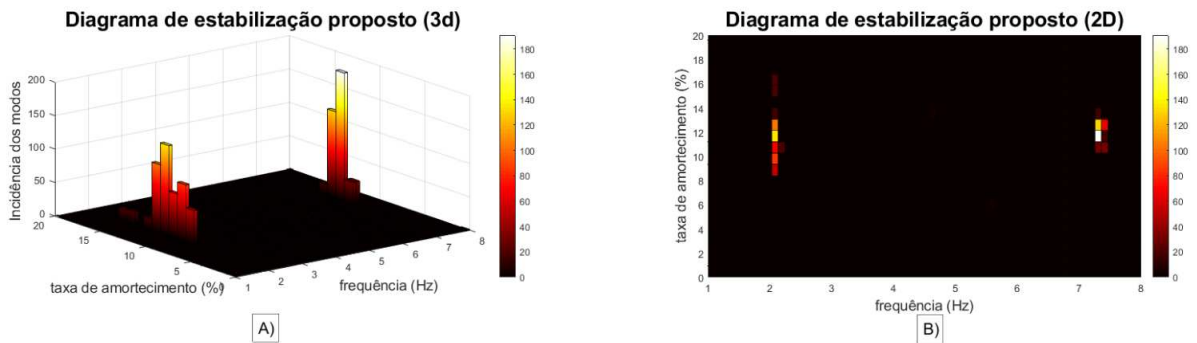


FIGURA 24 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 10 minuto de janela de dados.

A Figura 25 apresenta os resultados do método N4SID para uma janela de dados de 10 minutos. Os gráficos *a* e *b* apresentam uma grupamento de frequência próxima a 2,1Hz e com espalhamento no amortecimento entre as células de 7 a 14%, mas com uma célula se destacando com maior incidência em 11%, um segundo agrupamento de células, com menor intensidade e maior espalhamento, entre as frequências de 7 a 7,5Hz e amortecimento entre 7 e 15% também é estimado.

É possível concluir que o método N4SID indicou a presença de um modo eletromecânico

de frequência próxima a 2,1Hz, a célula com maior incidência nessa região indica que o amortecimento desse modo está em torno de 11%, o que é comparável em frequência e amortecimento (considerando a célula de maior incidência do primeiro agrupamento) com o modo de frequência de 2,09Hz obtido via modelo conceitual. Ainda, com relação ao segundo agrupamento, devido a proximidade com a frequência de corte do filtro, a sua incidência menor e espalhamento maior, pode-se considerar as células de frequência mais elevadas, entre 7 e 7,5Hz, como modos espúrios, resultado do processo de filtragem.

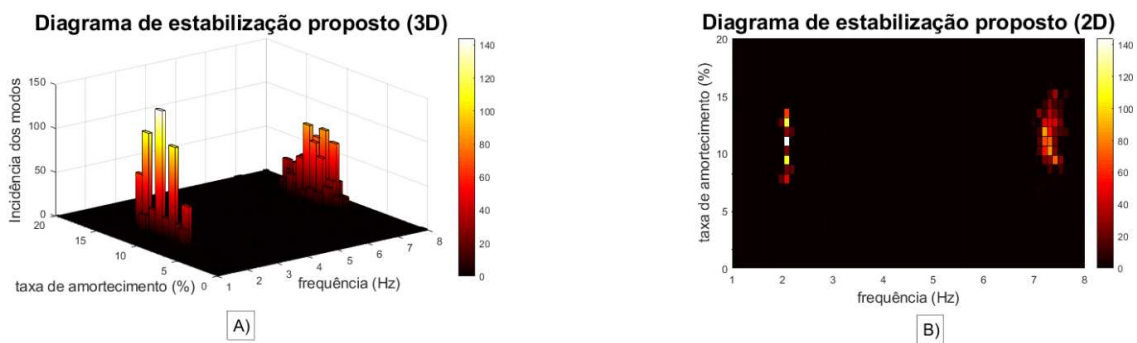


FIGURA 25 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 10 minuto de janela de dados.

A Figura 26 apresenta os resultados do método YW obtidos para uma janela de dados de 5 minutos. Os gráficos *a* e *b* apresentam dois grupos de células. O primeiro, de menor intensidade, com células de frequência próximas a 2,1Hz e amortecimento entre 7 e 14%, com uma célula de pouco destaque com amortecimento de 12%, e um segundo agrupamento, com maior intensidade, em células de frequência próximas a 7,4Hz, com o amortecimento, entre 10 e 14%, apresentado ainda nesse segundo agrupamento de polo uma célula de maior incidência com amortecimento de 12%.

Pode-se concluir que pela baixa incidência de polos no primeiro grupo de células, que o método YW, a partir de uma janela de dados de 5 minutos, não conseguiu indicar com clareza a presença de um modo eletromecânico nessa região. O segundo grupo apresenta uma célula com grande incidência de polos, mas por estar localizado próximo a frequência de corte do filtro, é considerado como modo espúrio, resultado do processo de filtragem.

Por último, é apresentado o resultado do método N4SID para uma janela de dados de 5 minutos, Figura 27. Os gráficos *a* e *b* apresentam dois agrupamentos com maior incidência de polos. Um primeiro agrupamento de frequência próxima a 2Hz e com espalhamento no amortecimento entre as células de 6 a 14%, com uma célula com maior incidência de 13% de amortecimento. O segundo agrupamento apresentou um espalhamento maior de células na frequências, entre de 7 e 8Hz e amortecimento entre 6 e 15%.

Utilizando janelas de dados de 5 minutos, pode-se notar um maior espalhamento das estimativas para ambos os métodos, mas no N4SID, esse espalhamento mais fica evidenciado,

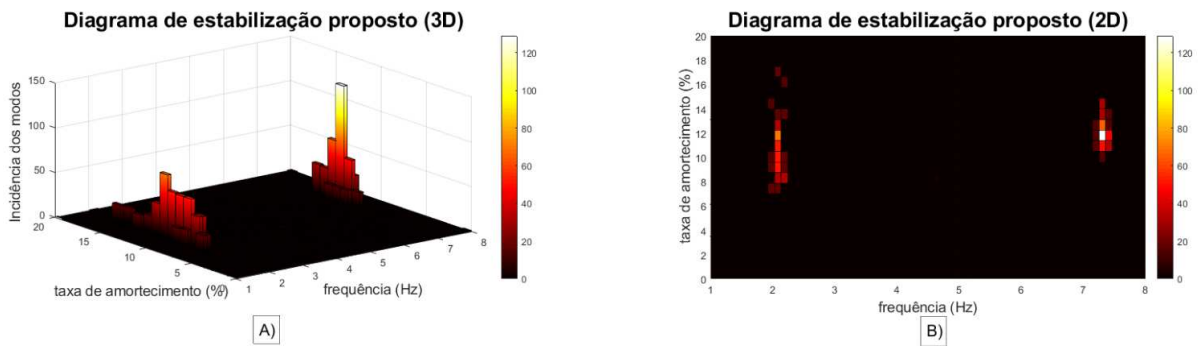


FIGURA 26 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 5 minuto de janela de dados.

principalmente nos valores de amortecimento das estimativas. Apesar disso, nesse último caso, ainda é possível identificar uma célula com praticamente o dobro de incidência de polos do que sua vizinhança, que pode indicar um modo eletromecânico de frequência 2,1Hz e amortecimento de 13%. Já o agrupamento de células com frequências mais elevadas, podem ser consideradas modos espúrios por apresentarem frequências próximas a faixa de corte do filtro, podendo estarem relacionadas ao processo de filtragem.

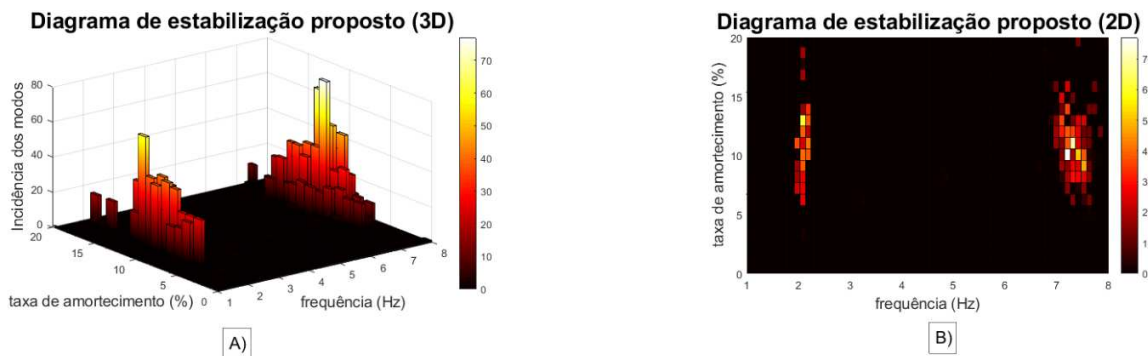


FIGURA 27 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 5 minuto de janela de dados.

Nesse terceiro cenário, com a presença de ruído de medição e com a aleatoriedade da carga, pode-se notar uma maior dispersão na incidência de polos que os cenários anteriores. Essa tendência se mostrou mais forte em janelas de dados menores. O método YW, para uma janela de dados de 10 e 20 minutos, apresentou menor espalhamento de polos próximo a célula de maior incidência de frequência próxima a 2,1Hz, mas o método N4SID, apesar de certo espalhamento nessa região, apresentou um pico central nesse agrupamento com maior incidência comparados as demais células do diagrama. Para janelas de dados de 5 minutos o método N4SID apresenta um melhor desempenho.

4.1.4.4 Conclusões obtidas para o sistema teste 1

Nesse primeiro sistema teste, com a presença de geradores síncronos relevantes no suprimento das cargas do sistema, junto com a proximidade das cargas da rede de distribuição,

tornou bastante observável o modo global presente na rede de distribuição. Sendo um modo de frequência próxima a 2,1Hz e amortecimento entre 10 e 12% estimado por ambos os métodos em todos os cenários.

Para o primeiro cenário, ambos os métodos obtiveram boas estimativas, mas o método N4SID apresentou uma incidência mais concentrada de polos nas células do sistema. No segundo cenário, considerando ruído de medição sobre uma mesma carga, é possível notar o aumento de modos espúrios de menor incidência principalmente com janela de dados de 5 minutos, mas ambos os métodos indicaram de forma correta o modo global do caso base.

Para o terceiro cenário, com a presença de diferentes conjuntos de dados com ruído, os métodos tiveram um maior espalhamento nas estimativas de amortecimento dos modos. Nesse cenário, de forma geral o método YW obteve melhor desempenho para janelas maiores que 10 minutos.

4.2 SISTEMA TESTE 2

O segundo sistema teste representa uma rede de distribuição com grande penetração e diferentes tecnologias de GD tendo a capacidade de operar de forma ilhada. O diagrama unifilar do sistema teste 2 é apresentado na Figura 28. A rede de distribuição opera com um nível de tensão de 20kV e está conectada por um transformador a uma rede de sub transmissão com tensão de 150kV. O sistema é composto por 37 barras, nas quais estão incluídas cargas dinâmicas representadas por 18 motores de indução, além de cargas estáticas, totalizando um consumo de 10,85MW e 8,32MVA_r (KONTIS et al., 2018).

Três tipos de tecnologias de GD estão presentes no sistema, sendo elas: i) PCH's, representadas por quatro geradores síncronos conectados nas barras 08, 09, 10 e 11. ii) gerador eólico, representado por um gerador de indução com dupla alimentação conectado na barra 21, iii) geração fotovoltaica, representada por seis plantas solares conectadas nas barras 28, 29, 30, 31, 35 e 36. Isso totaliza uma capacidade de geração acoplada a rede de distribuição de 18,44MW, com uma capacidade de geração maior que seu consumo, o que significa que o excedente de potência ativa gerada na rede de distribuição está sendo consumida pela rede de sub transmissão. Além do mais, isto evidencia que a rede pode operar de forma ilhada, embora esta situação operativa não tenha sido alvo de investigação nesta dissertação de mestrado (KONTIS et al., 2018).

Os sinais de frequência amostrados que serão utilizados no processo de estimação modal foram coletados das barras 3, 8 (gerador SG1) e 11 (gerador SG2).

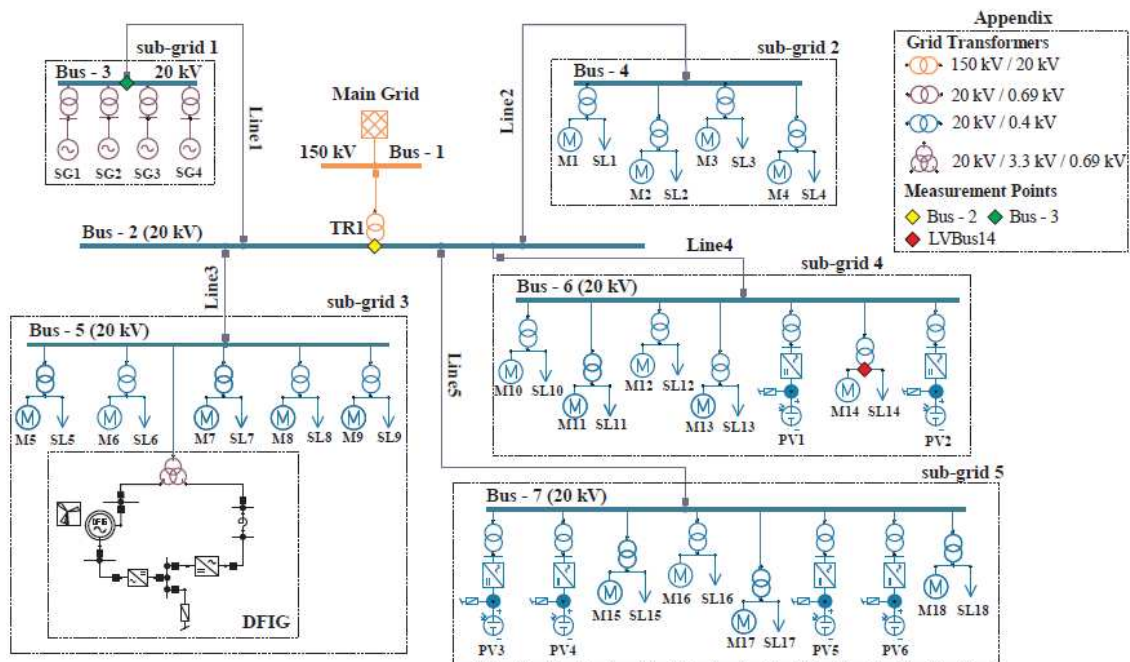


FIGURA 28 – Diagrama unifilar da rede de distribuição do sistema teste 2

Fonte: – (KONTIS et al., 2018)

4.2.1 Determinação do ponto de operação

A determinação do ponto de operação do sistema teste 2 é realizada pelo programa ANAREDE, utilizando o modelo estático da rede de distribuição. Essa etapa tem como objetivo calcular o fluxo de potência para o caso base.

Sendo assim, seguem as Tabelas 5 e 6 com as informações da condição operativa em regime permanente e os dados dos parâmetros das linhas da rede de distribuição.

TABELA 5 – Dados de barra e condição operativa do sistema teste 2

Barra	V (pu.)	Ângulo (graus)	Tipo	Geradores		Carga		Shunt
				P(MW)	Q (MVA)	P (MW)	Q (MVA)	
01	1,000	0,00	V θ					
02	0,991	6,2	PQ					
03	0,996	6,4	PQ					
04	0,978	5,7	PQ					
05	1,001	6,6	PQ					
06	0,987	6,3	PQ					
07	0,985	6,6	PQ					
08	1,000	6,8	PQ	1,485	0,72			
09	1,000	6,8	PQ	1,485	0,72			
10	1,000	6,8	PQ	1,485	0,72			
11	1,000	6,8	PQ	1,485	0,72			
12	0,958	3,8	PQ			0,320	0,015	
13	0,950	3,7	PQ			0,510	0,217	
14	0,967	4,4	PQ			0,375	0,093	
15	0,949	3,8	PQ			0,360	0,184	
16	0,973	4,9	PQ			0,290	0,218	
17	0,977	5,0	PQ			0,290	0,218	
18	0,971	4,9	PQ			0,290	0,218	
19	0,976	4,9	PQ			0,350	0,207	
20	0,967	4,3	PQ			0,290	0,218	
21	1,019	8,3	PQ	6,5	4,0			
22	1,017	8,1	PQ					
23	0,971	5,4	PQ			0,290	0,218	
24	0,983	6,0	PQ					
25	0,961	4,7	PQ			0,510	0,355	
26	0,963	4,1	PQ			0,360	0,142	
27	0,970	5,2	PQ			0,350	0,198	
28	1,000	8,9	PV	1,00				
29	1,000	8,9	PV	1,00				
30	1,000	9,3	PV	1,00				
31	1,000	9,3	PV	1,00				
32	0,946	4,4	PQ			0,450	0,338	
33	0,965	4,9	PQ			0,365	0,132	
34	0,961	4,9	PQ			0,360	0,174	
35	1,000	9,3	PV	1,00				
36	1,000	9,3	PV	1,00				
37	0,944	3,6	PQ			0,520	0,294	

Fonte: – (KONTIS et al., 2018)

TABELA 6 – Dados das linhas e transformadores do sistema teste 2

De	Para	Elemento	R(%)	X(%)
01	02	Transformador	0,2362	16,8700
02	03	Linha	0,5375	0,8350
02	04	Linha	2,6875	4,1750
02	05	Linha	2,1500	3,3400
02	06	Linha	1,6125	2,5050
02	07	Linha	2,6875	4,1750
03	08	Transformador	0,2190	5,0904
03	09	Transformador	0,2190	5,0904
03	10	Transformador	0,2190	5,0904
03	11	Transformador	0,2190	5,0904
04	12	Transformador	8,4000	47,300
04	13	Transformador	8.4000	47.300
04	14	Transformador	8.4000	47.300
04	15	Transformador	8.4000	47.300
05	16	Transformador	8.4000	47.300
05	17	Transformador	8.4000	47.300
05	18	Transformador	8.4000	47.300
05	19	Transformador	8.4000	47.300
05	20	Transformador	8.4000	47.300
05	21	Transformador	0,0	10,700
21	22	Transformador	0,0	0,860
22	05	Transformador	0,00	7,160
06	23	Transformador	8.4000	47.300
06	24	Transformador	8.4000	47.300
06	25	Transformador	8.4000	47.300
06	26	Transformador	8.4000	47.300
06	27	Transformador	8.4000	47.300
06	28	Transformador	8.4000	47.300
06	29	Transformador	8.4000	47.300
07	30	Transformador	8.4000	47.300
07	31	Transformador	8.4000	47.300
07	32	Transformador	8.4000	47.300
07	33	Transformador	8.4000	47.300
07	34	Transformador	8.4000	47.300
07	35	Transformador	8.4000	47.300
07	36	Transformador	8.4000	47.300
07	37	Transformador	8.4000	47.300

Fonte: – (KONTIS et al., 2018)

4.2.2 Simulação da operação ambiente

A simulação dinâmica para o segundo sistema teste também é realizada no programa ANATEM com base no fluxo de potência calculado no ANAREDE. Para realizar a análise não linear do sistema é apresentado no ANEXO B o modelo dos geradores síncronos e gerador de indução com dupla alimentação. Uma peculiaridade do sistema teste 2 é a presença de cargas dinâmicas na forma de motores assíncronos buscando melhor representar uma rede de distribuição, também sendo representados no modelo do sistema e apresentados também no ANEXO B. Sendo a subestação que faz a conexão da rede de distribuição com o sistema de transmissão representado por um barramento infinito.

Para simular uma resposta ambiente do sistema, considera-se uma variação aleatória de 10% da potência ativa das cargas dos barramentos 12, 13, 15, 20 e 32, em destaque vermelho na Tabela 5. Essa variação aleatória é governada por um gerador de números pseudos aleatórios implementado no ANATEM através de um controlador definido pelo usuário (CDU), que é apresentado no ANEXO C.

4.2.3 Análise linearizada via Pacdyn

Da mesma forma que o sistema teste 1, modos eletromecânicos são calculados pelo programa Pacdyn como os autovalores da matriz A do modelo linearizado, com base na leitura dos cartões de entrada do sistema utilizado no Anatem.

A tabela abaixo contém os modos eletromecânicos calculados pelo Pacdyn.

TABELA 7 – Modos eletromecânicos via modelo conceitual sistema teste 2

Modo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
1	1,45	11,71
2	1,65	16,67
3	1,65	16,67
4	1,65	16,67

Fonte: – do Autor(2020)

Com a análise realizada pelo Pacdyn, nota-se a presença de 4 modos eletromecânicos no sistema teste 2, todos com frequência muito próxima, sendo o primeiro com frequência de 1,45Hz e os outros 3 com frequência de 1,65Hz. O primeiro modo eletromecânico possui amortecimento de 11,71% sendo o modo global do sistema em estudo. O demais modos, 2,3 e 4 possuem amortecimento de 16,67%, relacionados a um modo intraplanta, caracterizados por subconjuntos dos geradores síncronos. Assim, tem-se como objetivo principal do processo de estimação modal, e com o pós-processamento realizado pelo diagrama de estabilização, identificar o modo dominante de 1,45Hz.

4.2.4 Resultados

Da mesma forma que o sistema teste 1, os sinais amostrados são pré-processados e utilizados como as variáveis de saída do vetor $y(k)$ para o modelo estimado pelos métodos de decomposição modal, N4SID e YW. Como parâmetros de entrada de ambos os métodos foram utilizados modelos de ordem máxima igual a 20, além de um período de amostragem de 0,01s. Além disso, está sendo utilizado o método N4SID em sua versão multi-sinais, com três sinais de entrada, e o método YW na versão mono-sinal, tendo em vista que sua versão multi-sinais não apresentou resultados satisfatórios.

Os três cenários propostos são aplicados nesse segundo sistema teste, porém, para facilitar a leitura, é apresentado apenas o terceiro cenário, em que é analisado o efeito da aleatoriedade da carga e a presença de ruído de medição no processo de estimação modal. Este cenário é escolhido por analisar os efeitos do primeiro e segundo cenário juntos. Os dois primeiros cenários são apresentados no ANEXO F caso o leitor tenha interesse.

Para o terceiro cenário, são apresentados as janelas de dados de 5, 10 e 20 minutos, os demais resultados de 1 e 15 minutos são apresentados no ANEXO F, após os resultados do cenário 1 e 2.

Mantendo a mesma sequência da apresentação dos resultados das janelas de dados do sistema teste 1, os resultados com janelas de dados de 20 minutos são apresentados em uma figura composta de 4 gráficos, com o intuito de estabelecer um comparativo entre o diagrama de estabilização convencional e os diagramas de estabilização propostos (em 3D e 2D) e trazendo ainda como base os modos estimados via modelo conceitual obtido pelo software PacDyn. Sendo os gráficos ordenados em *A*, *B*, *C* e *D*. O gráfico *A* é formado pelo diagrama de estabilização 3D, o gráfico *B* é formado pelo diagrama de estabilização 2D, o gráfico *C* é formado pelo diagrama de estabilização convencional, e o gráfico *D* traz os modos eletromecânicos obtidos via modelo conceitual com o objetivo de validar as estimativas obtidas nos diagramas de estabilização.

Novamente para não apresentar gráficos repetitivos, os resultados para janelas de dados de 5 e 10 minutos são formados apenas pelos gráficos *a* e *b*, referentes aos diagramas de estabilização propostos de 3D e 2D.

4.2.4.1 Cenário 3

Para o terceiro cenário é analisado tanto a influência da aleatoriedade da carga como a presença de ruído no sinal medido. Para tanto, é adicionado um ruído branco para cada um dos 30 conjuntos de dados utilizados no cenário 1. Dessa forma, os sistemas serão analisados com as diferentes variações de carga que estimulam diferentes respostas ambiente do sistema com a presença de ruído de medição.

O primeiro resultado apresentado para o sistema teste é referente ao método YW com

uma janela de dados de 20 minutos, conforme mostrado na Figura 29. A partir dos gráficos *a* e *b*, pode-se notar um agrupamento de células de frequência próxima a 1,5Hz e amortecimento entre 9 e 15%, com uma célula de maior incidência com amortecimento de 11%. Um segundo grupo de células com menor incidência pode ser percebido com frequência em torno de 7Hz e amortecimento de 1%, além de células com menor incidência espalhadas ao longo do diagrama.

Com isso, é possível concluir a partir da análise que o método YW estimou um modo eletromecânico indicado pelo diagrama de estabilização proposto, através da célula de maior incidência, de frequência próxima a 1,5Hz e amortecimento de 11%. Sendo esse modo eletromecânico comparável ao modo dominante de frequência 1,45Hz e amortecimento de 11,71% obtido via modelo conceitual do sistema. Já o segundo grupo de células, devido a proximidade com a frequência de corte do filtro empregado, pode estar associado ao processo de filtragem na etapa de pré-processamento, sendo considerado como modo espúrios. As demais células podem ser consideradas como modos espúrios pela sua baixa incidência e espalhamento ao longo do diagrama.

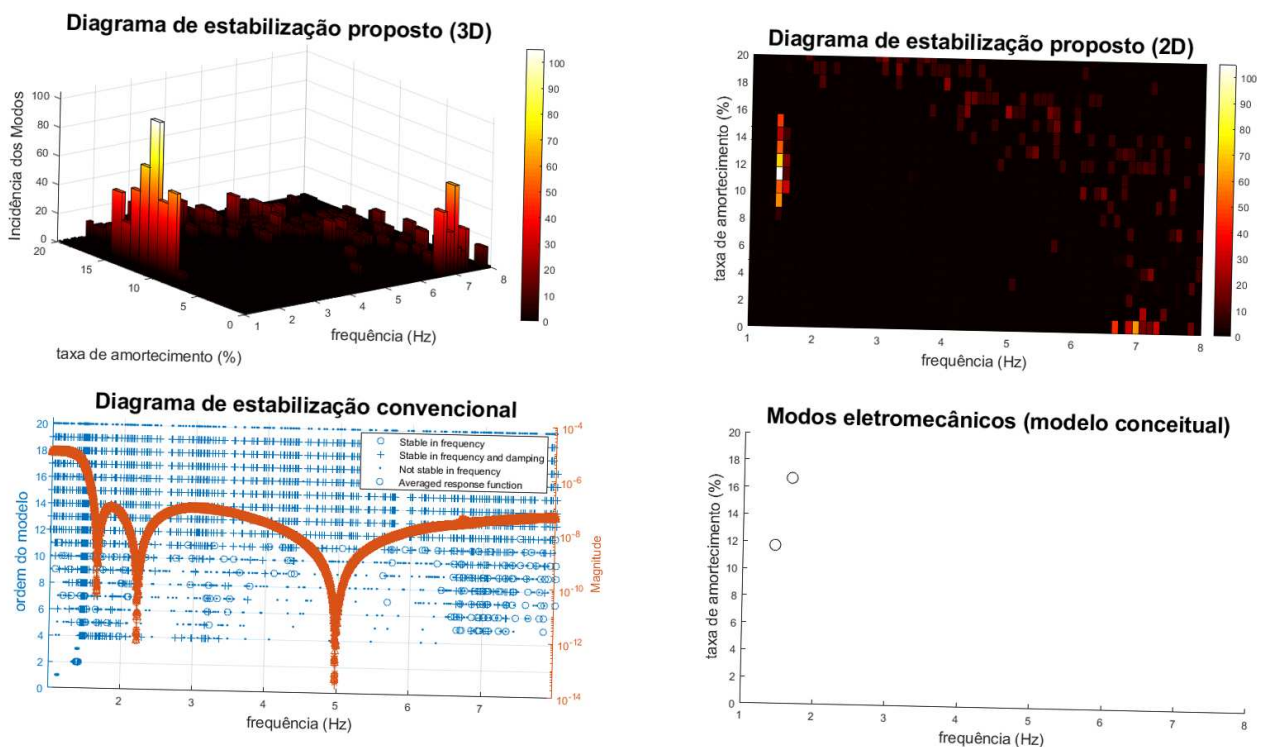


FIGURA 29 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 20 minuto de janela de dados.

A Figura 30 apresenta o resultado para o método N4SID com uma janela de dados de 20 minutos. Observando os gráficos *a* e *b* nota-se um agrupamento de células de frequência em 1,5Hz. Esse grupo contém duas células com maior incidência de polos, uma com amortecimento de 5% e a outra com amortecimento de 11%. Algumas poucas células com baixa incidência de polos pode ser notadas próximas a esse agrupamento.

A partir do resultado analisado da Figura 30 e considerando as duas células com maior incidência de polos, pode-se concluir que foram estimados dois modos eletromecânicos de mesma frequência, 1,45Hz, mas com amortecimento distintos, 5% e 11%. Porém, apenas o modo com amortecimento de 11% é comparável ao modo dominante presente no sistema. Assim, apesar de estimar um modo com frequência abaixo do esperado comparando com os modos obtidos via modelo conceitual, o método N4SID mostrou sensibilidade a presença dos dois modos com frequência próximas apontados na análise do modelo conceitual.

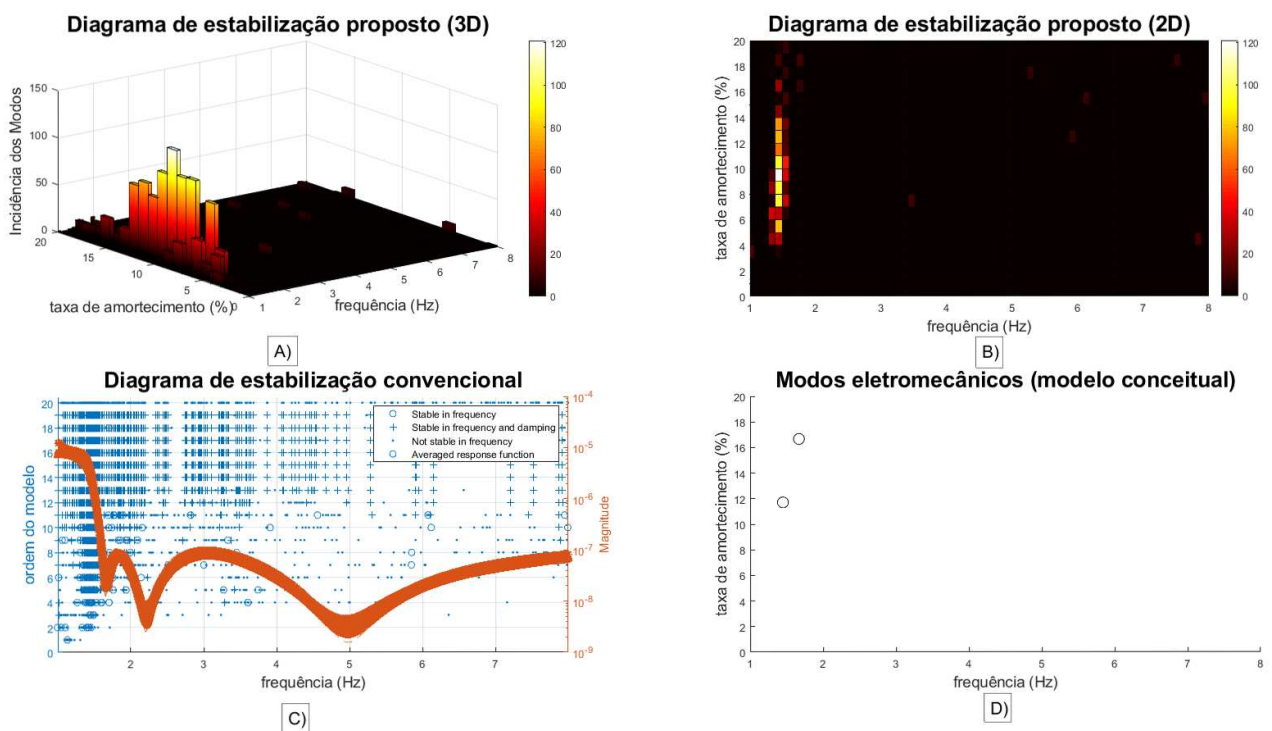


FIGURA 30 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 20 minuto de janela de dados.

Para uma janela de dados de 10 minutos, a Figura 31 apresenta o resultado para o método YW. Nota-se um grupo de células com frequência próxima a 1,5Hz, com uma célula de maior incidência com amortecimento de 11%. Além desse grupo, tem-se várias células com baixa incidência de polos espalhadas ao longo dos diagramas.

Considerando a análise dos gráficos *a* e *b*, pode-se concluir que o método YW estimou um modo eletromecânico na célula de maior incidência, localizada na frequência de 1,5Hz e amortecimento de 11%. Esse modo é comparável ao modo dominante obtido via modelo conceitual que busca-se estimar nesse sistema. As demais células podem ser consideradas como modos espúrios devido sua baixa incidência.

Continuando com uma janela de dados de 10 minutos, tem-se o resultado para o método N4SID, apresentado na Figura 32. Nesses diagramas, nota-se um agrupamento de células de frequência em torno de 1,5Hz, com um espalhamento na frequência entre 3 e 17%,

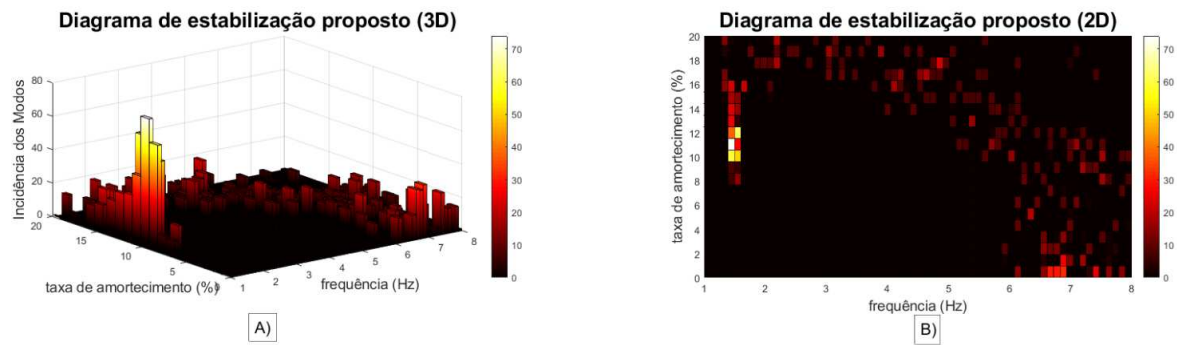


FIGURA 31 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 10 minuto de janela de dados.

com uma célula de maior incidência com amortecimento de 5%.

Considerando o resultado apresentado na Figura 32, conclui-se o método N4SID estimou um modo eletromecânico de frequência próxima a 1,5Hz e amortecimento de 5%. Comparando com o modo dominante obtido via modelo conceitual do sistema, é possível concluir que o modo estimado apresenta valor bem abaixo do esperado. Assim ainda que tenha estimado a frequência do modo dominante o método N4SID não estimou corretamente seu amortecimento, para uma janela de dados de 10 minutos.

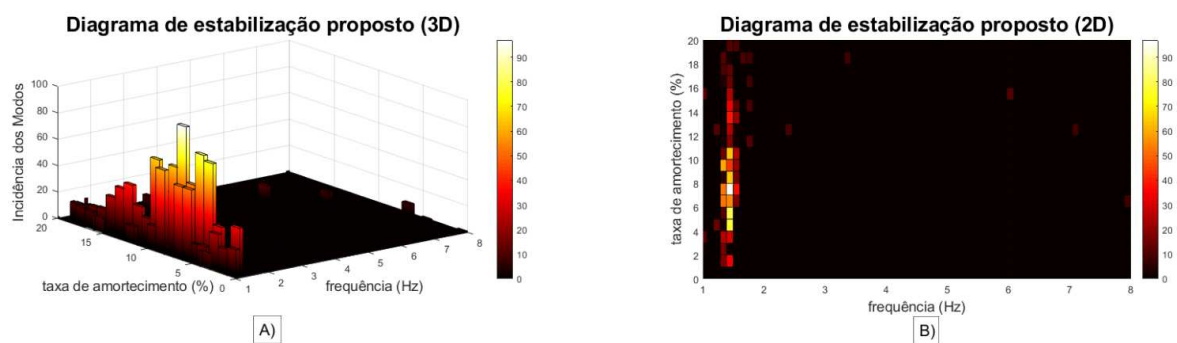


FIGURA 32 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 10 minuto de janela de dados.

O resultado para o método YW para uma janela de dados de 5 minutos é apresentado na Figura 33. Observando os gráficos *a* e *b* percebe-se dois grupos de células. O grupo mais proeminente está entre as células de frequência de 1,5Hz, com uma célula com maior incidência de polos de amortecimento de 11%. O segundo grupo de células apresenta uma incidência menor de polos e está localizado em frequências próximas a 7Hz. Além desses grupos, diversas células com baixa incidência pode ser notadas ao longo do diagrama.

Pode-se concluir com essa análise, com base na célula de maior incidência, que o método YW estimou um modo eletromecânico de frequência de 1,5Hz e amortecimento de 11%. Sendo que, esse modo estimado é comparável em frequência e amortecimento com o modo dominante do sistema obtido via modelo conceitual. O segundo grupo de células apresenta baixa incidência de polos, além de estar localizado próximo a frequência de corte do

filtro empregado, podendo ser considerado como um modo espúrio resultado do processo de filtragem, conforme análise apresentada no anexo D.

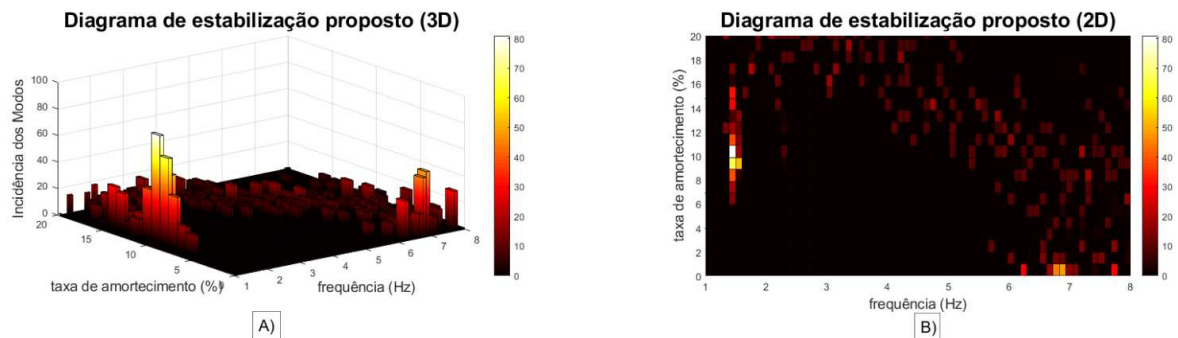


FIGURA 33 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 5 minuto de janela de dados.

Por último, é apresentado o resultado do método N4SID com uma janela de dados de 5 minutos, conforme Figura 34. Nesses diagramas, gráfico *a* e *b*, nota-se um agrupamento de células em torno da frequência de 1,5Hz, com um espalhamento de células no amortecimento entre 5 15%. Esse grupo de células contém duas células com maior incidência de polos, uma mais proeminente, com 5% de amortecimento e outra com 11% de amortecimento.

Com a análise da incidência de polos da Figura 34, conclui-se que o método estimou um modo eletromecânico de frequência 1,5Hz e amortecimento de 5%, que é comparável em frequência, mas não em amortecimento, com o modo dominante obtido via modelo conceitual. A segunda célula com maior incidência tem frequência e amortecimento comparáveis ao modo dominante do sistema, mas como não apresenta grande destaque na incidência de polos em relação as células em sua vizinhança, a estimação desse modo eletromecânico acaba sendo não conclusivo.

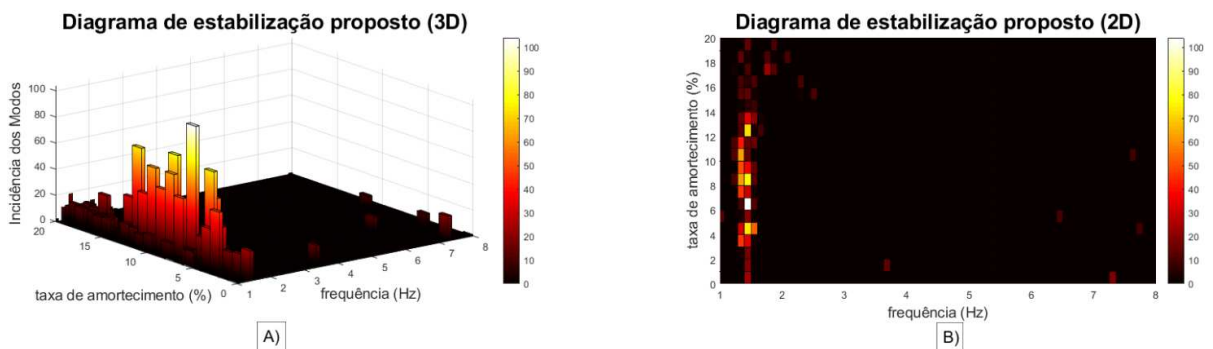


FIGURA 34 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 5 minuto de janela de dados.

4.2.4.2 Conclusões obtidas para o sistema teste 2

Com o segundo sistema teste é possível observar que com geradores síncronos de menor potência com relação aos demais geradores, além de cargas mais uniformemente espalhadas pela

rede de distribuição, os modos eletromecânicos são menos estimulados no sistema. Assim os modos se tornam menos observáveis, dificultando sua estimação pelos métodos de decomposição modal. Isso pode ser percebido pelo maior espalhamento no amortecimento dos polos estimados nos diagramas de estabilização.

Mesmo assim, ambos os métodos foram capazes de indicar a presença de um modo eletromecânico de frequência próxima a 1,5Hz, cumprindo o objetivo de estimar o modo dominante presente no sistema, apesar das estimativas do amortecimento desse modo ter ficado um pouco abaixo do esperado em alguns casos.

No entanto, percebe-se que o método YW teve um melhor desempenho que o método N4SID, por ser capaz de estimar a frequência e o amortecimento comparável ao modo dominante em todos os casos apresentados nesse cenário 3.

4.3 PROCESSAMENTO DE DADOS DE μ PMU LOCALIZADAS NA UFPR

As μ PMU utilizadas para coleta de dados em redes de distribuição deste trabalho, fazem parte do sistema de monitoramento que está sendo desenvolvido pela UFPR em parceria com a Copel distribuidora. Esse projeto contempla a implantação de painéis fotovoltaicos, geração síncrona à biodiesel (que até a presente data não se encontra ainda em operação), 5 μ PMU para coleta de dados e uma central de monitoramento para o acompanhamento da operação da rede.

Do total das μ PMU instaladas, uma está localizada no campus Agrária da UFPR em Curitiba, outras duas no Campus Politécnico da UFPR, sendo uma próxima aos painéis fotovoltaicos e outra no transformador de entrada do DELT da UFPR, Figura 35. No entanto, o sistema de monitoramento que está sendo implementado abrange também μ PMU instaladas além dos campus da UFPR em Curitiba. Foram instaladas μ PMU na baixa tensão da subestações da cidade de Faxinal e no Campus Palotina da UFPR, localizadas no Paraná, com o intuito de monitorar suas redes de distribuição, Figura 36.

Estão sendo utilizadas μ PMU da *Power Standarts Labs* (PSL), com capacidade de realizar até 120 medições sincronizadas por segundo das variáveis de tensão e corrente (módulo e ângulo), potência ativa e reativa e fator de potência, em conformidade com as normas IEEE C37.118.1-2011 e C37.118.2-2011. As μ PMU realizam as medições dos fasores da rede e adicionam localmente uma estampa de tempo nessas amostras, através de sinais de GPS. Esses dados são, então, enviados por canais de comunicação a um servidor concentrador localizado na central de monitoramento dentro da UFPR. Esse servidor tem o objetivo de receber, organizar, armazenar e disponibilizar esses dados para as diversas aplicações, dentre elas a estimação de modos eletromecânicos de baixa frequência (POLEDNA et al., 2019).

A central de monitoramento é formada por monitores para o acompanhamento da operação das redes de distribuição, um servidor concentrador e computadores onde são realizados

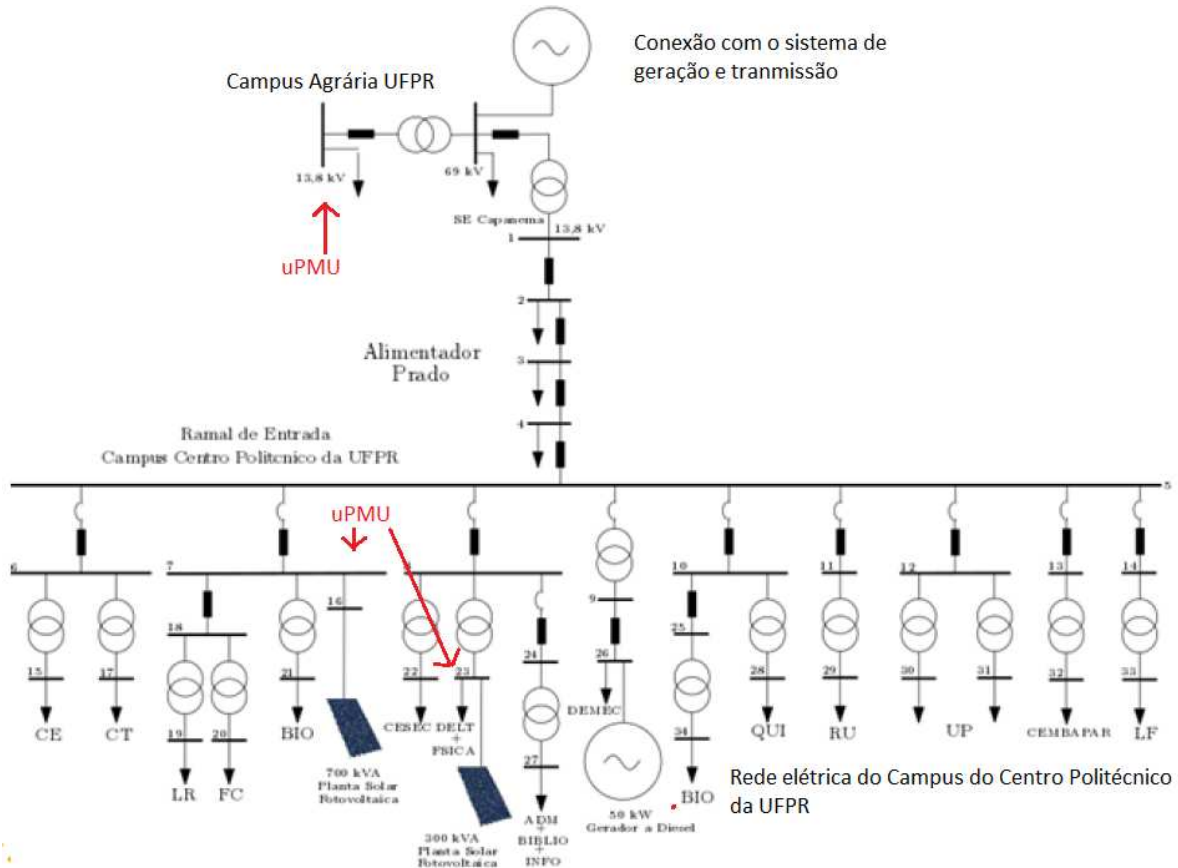


FIGURA 35 – Diagrama unifilar com a localização das μ PMU

Fonte: – Vega

os estudos relacionados a operação, monitoramento e estabilidade da mini rede da UFPR.

Vale ressaltar, que o objetivo no processamento de dados coletados por μ PMU, é conseguir estimar modos interáreas presentes no sistema, já que a geração síncrona ainda não está em operação, não sendo estimulados modos eletromecânicos relacionados a rede de distribuição.

Os métodos YW e N4SID são empregados em sua versão mono sinal, ou seja, os dados coletados por apenas uma μ PMU são utilizados para o processo de estimação modal. Modelos de ordem máxima igual a 25 estão sendo considerados para o método YW e de ordem máxima igual 20 para o método N4SID.

Os sinais de frequência estão sendo amostrados pelas μ PMU a uma taxa de 120 amostras por segundo. No entanto, devido a presença de dinâmicas na rede elétrica que não estão sendo consideradas nas simulações computacionais, percebeu-se a necessidade de realizar uma re-amostragem do sinal por um fator de 10, sendo utilizado assim uma taxa de 12 amostras por segundo no processo de estimação modal. Esse procedimento tem o efeito de um filtro passa-baixa, eliminando oscilações que não são representadas com um número menor de amostras. Resultando ainda na diminuição do tempo necessário de processamento e reduzindo



FIGURA 36 – Localização das μ PMU no estado do Paraná

Fonte: – Vega

TABELA 8 – Modos eletromecânicos do sistema interligado nacional

Modos	Faixa de frequência
Norte \times Sul	0,20 a 0,40Hz
Sul \times Sudeste	0,60 a 0,80Hz
Norte \times Nordeste	0,55 a 0,65Hz
Mato Grosso \times SIN	0,40 a 0,45Hz
Rio de Janeiro \times SIN	1,10 a 1,30Hz
São Paulo \times SIN	0,65 a 0,75Hz

Fonte: – (PRIOSTE et al., 2011)

os problemas numéricos relacionados a sensibilidade na conversão de polos discretos para polos contínuos (LEANDRO et al., 2014).

Considerando que a faixa de interesse dos modos interárea que busca-se estimar está situada entre 0,1 e 3Hz, é empregado um filtro *butterworth* de ordem 8 nessa faixa de interesse. Sendo os principais modos interárea que se manifestam no SIN apresentados na Tabela 8.

Assim, analisando a Tabela 8, o modo Norte \times Sul com frequência entre 0,20 e 0,40Hz e o modo Sul \times Sudeste com frequência entre 0,60 e 0,80Hz são os principais modos que pretende-se estimar nesse trabalho de pesquisa. Tendo em vista que as μ PMU estão todas localizadas na região sul, no estado do Paraná.

A faixa de frequências nos diagramas de estabilização 3D e 2D foram alteradas para apresentar os modos de 0,2 a 1,5Hz. Dessa forma, dando ênfase aos modos interáreas presentes no SIN, conforme os valores apresentados na Tabela 8.

4.3.1 Resultados obtidos para μ PMU localizada no DELT

A primeira μ PMU utilizada no processo de estimação modal está localizada no transformador de entrada do DELT da UFPR. Optou-se por usar apenas uma das duas μ PMU localizadas dentro do Campus Politécnico pela proximidade entre as mesmas na rede elétrica.

Os dados coletados são referentes aos dias 05 de maio de 2020 e 30 de setembro de 2020. Sendo apresentados os resultados dos métodos YW e N4SID onde os modos interáreas se mostraram mais observáveis, utilizando janelas de dados de 10 ou 15 minutos com uma taxa de 12 amostras por segundo.

Os dados do primeiro resultado apresentado são referentes ao dia 30 de setembro, coletados 17 horas e 20 minutos. A Figura 37 apresenta o resultado para o método YW com ordem máxima igual a 25, e uma janela de dados de 10 minutos (correspondente a 7200 amostras). Destaca-se nos gráficos *a* e *b* uma célula com maior incidência de polos de frequência 0,82Hz e amortecimento de 11%.

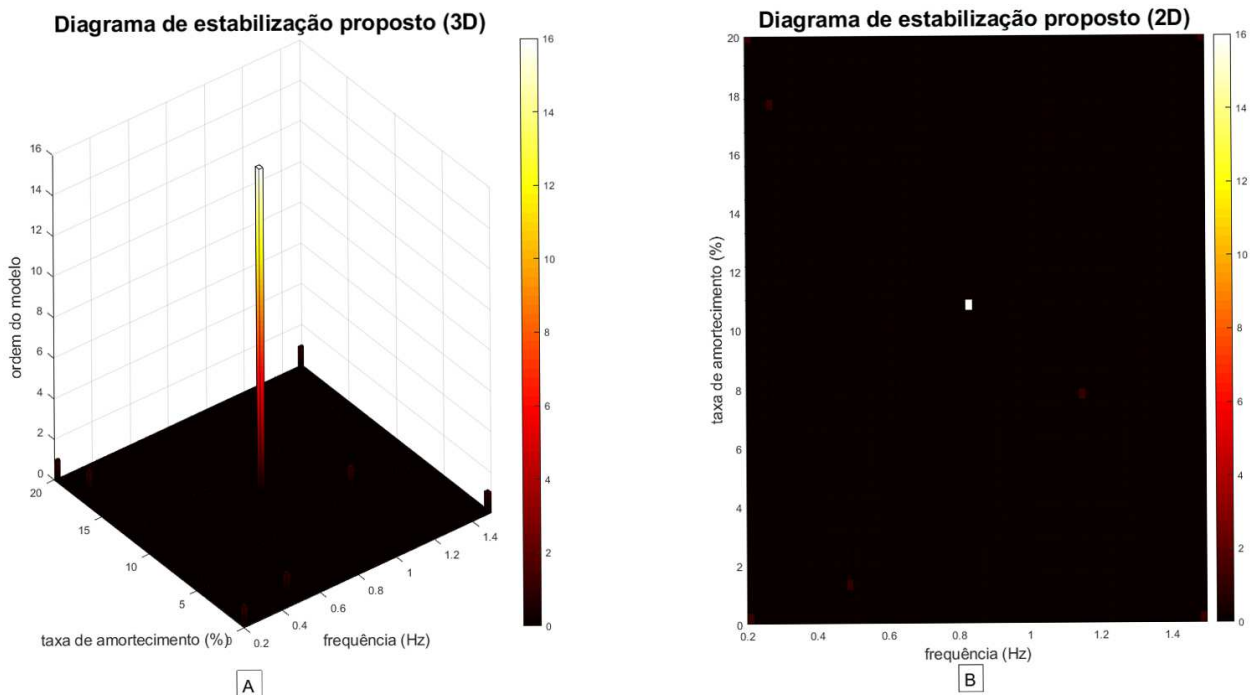


FIGURA 37 – Método YW com ordem máxima 25, data da amostra 30/09/2020 as 17:20

Com base na incidência de polos estimados para o conjunto de dados, pode-se concluir que o método YW estimou um modo eletromecânico de frequência 0,82Hz e amortecimento de 11%. Sendo o modo estimado comparável ao modo Sul \times Sudeste da Tabela 8.

Utilizando a janela de dados anterior, a Figura 38 apresenta o resultado para o método N4SID com ordem máxima igual a 20 e uma janela de dados de 10 minutos (7200 amostras). Analisando os gráficos *a* e *b* nota-se uma célula com maior incidência de polos de frequência 0,78Hz e amortecimento de 14%

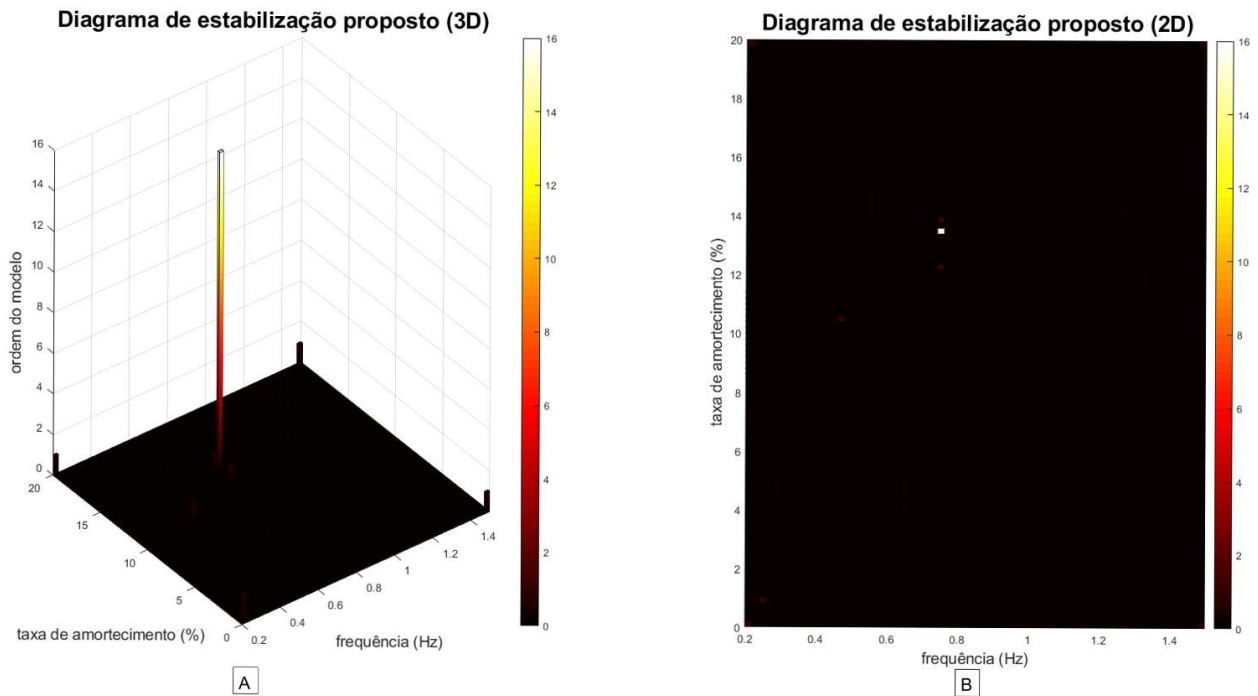


FIGURA 38 – Método N4SID com ordem máxima 20, data da amostra 30/09/2020 as 17:20

Pode-se concluir que o método N4SID estimou um modo eletromecânico de frequência 0,78Hz e amortecimento 13%. Esse modo sendo comparável ao modo interárea Sul × Sudeste. Destaca-se assim que ambos os métodos estimaram modos muito parecidos, o que é um bom indicativo da presença do modo estimado.

O resultado para os dados coletados no dia 05 de maio de 2020 as 18 horas, utilizando o método YW com ordem máxima de 25, é apresentado na Figura 39. Para esse caso está sendo utilizado uma janela de dados de 15 minutos (10800 amostras). Nota-se nos gráficos *a* e *b* uma célula em destaque pela incidência de polos estimados de frequência 0,41Hz e amortecimento de 8,5%.

Dessa forma, é possível concluir que o método YW estimou um modo eletromecânico de frequência de 0,41Hz e amortecimento de 8,5%, sendo possível de estabelecer uma comparação desse modo com o modo interárea Norte × Sul, por estar muito perto da faixa que esse modo se manifesta.

A Figura 40 apresenta o resultado para o método N4SID com ordem máxima 20 para a mesma janela de dados obtidas do dia 05 de maio as 18 horas e 20 minutos. O tamanho da janela utilizada para o processo de estimação também é de 15 minutos (10800 amostras). Observando os gráficos *a* e *b*, nota-se uma célula de maior incidência com frequência de 0,40Hz e amortecimento próximo a 8,5%.

A partir dessa análise, pode-se concluir que o método N4SID estimou um modo eletromecânico de frequência 0,40Hz e amortecimento de 8,5%. Assim, pode-se dizer que

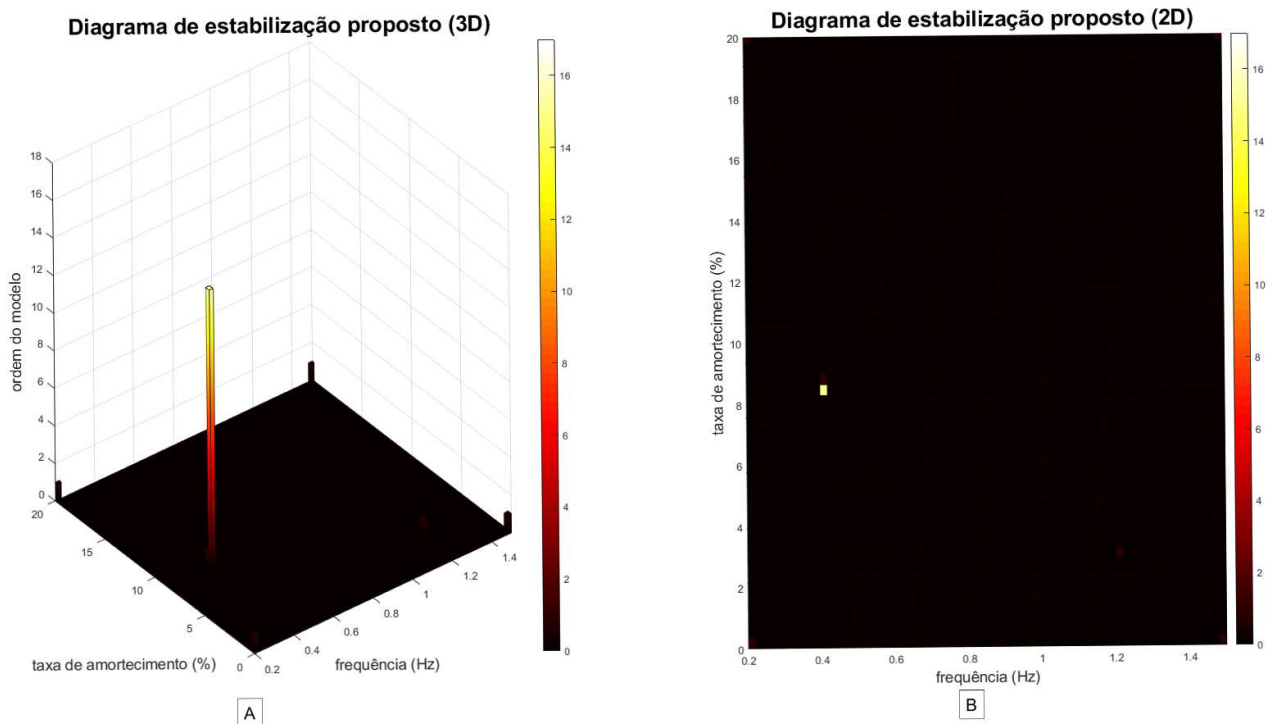


FIGURA 39 – Método YW com ordem máxima 25, data da amostra 05/05/2020 as 18:00

foi estimado um modo comparável em frequência ao modo interárea Norte \times Sul. Com isso, ambos os métodos estimaram um modo compatível com a faixa de frequência referente ao modo interárea Norte \times Sul. Apresentando estimativas da frequência e amortecimento muito próximas entre si.

Pode-se concluir de forma geral, a partir dos dados coletados da μ PMU localizada no Centro Politécnico da UFPR, que o diagrama de estabilização proposto e os métodos de decomposição empregados cumprem com o objetivo de estimar os modos interáreas presentes nos sinais amostrados da rede. No entanto, apesar dos resultados satisfatórios, a estimação modal em dados ambientes reais se mostrou uma tarefa não trivial. Ainda precisando de ajustes no processo de escolha do sinal amostrado e da estimação modal para melhorar o desempenho dos algoritmos. Sendo que os métodos não se mostraram capazes de obter boas estimativas quando os sinais utilizados apresentavam algum tipo de transitório.

4.3.2 Resultados obtidos para μ PMU localizada na cidade de Palotina-Pr

Nessa subseção são apresentados os resultados do processo de estimação modal para dados coletados da μ PMU que se encontra instalada na baixa tensão do Campus de Palotina da UFPR. Os dados amostrados são referentes aos dias 30 de setembro de 2020.

O primeiro resultado é referente ao dia 30 de setembro, com dados coletados às 17 horas. A Figura 41 apresenta o resultado para o método YW para uma ordem máxima de 20, sendo considerado uma janela de dados de 15 minutos (10800 amostras). Nota-se nestes

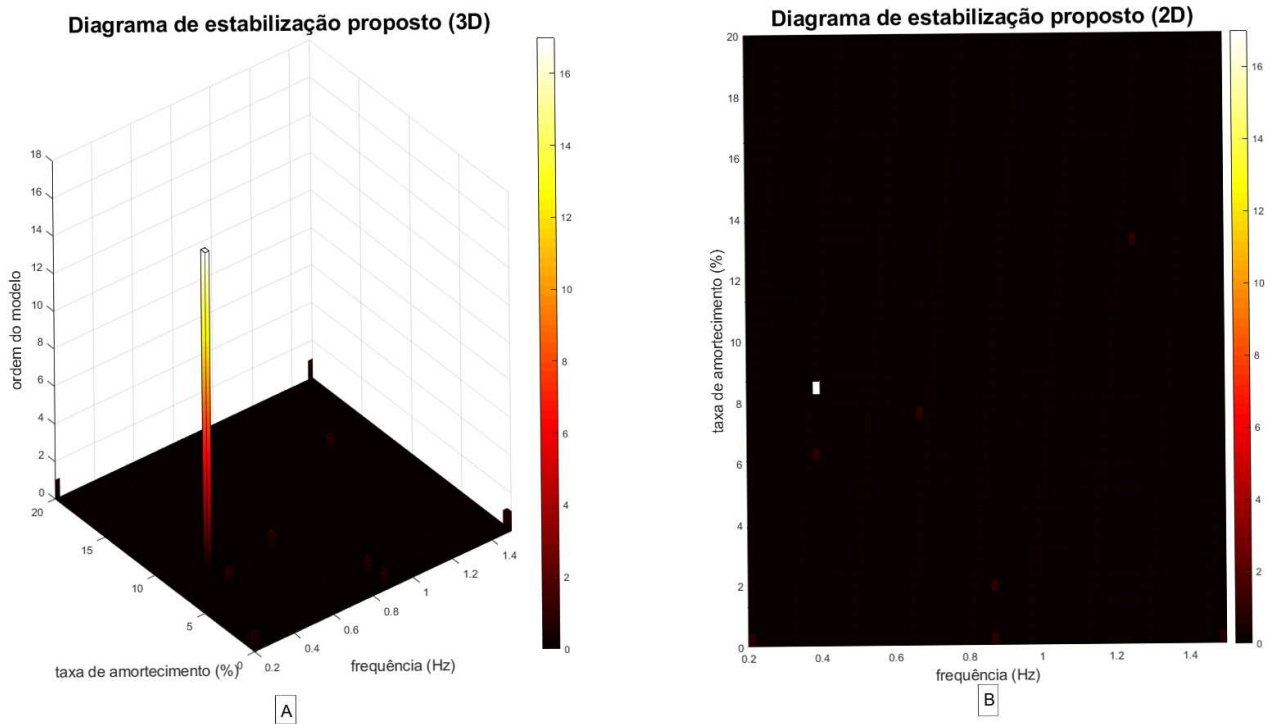


FIGURA 40 – Método N4SID com ordem máxima 20, data da amostra 05/05/2020 as 18:00

gráficos uma célula com grande incidência de polos, localizada na frequência de 0,86Hz e com amortecimento de 16%.

Com base no resultado apresentado, pode-se concluir que foi estimado um modo eletromecânico em 0,86Hz. Podendo estar relacionado ao modo interárea Sul \times Sudeste, no entanto, o modo estimado apresenta frequência um pouco acima da faixa de referência desse modo.

Com o mesmo conjunto de dados do resultado anterior (extraído dia 30 de setembro as 17:00), tem-se na Figura 42, o resultado para o método N4SID. Está sendo utilizado um modelo de ordem máxima 20 e uma janela de dados com 15 minutos de duração (10800 amostras). É possível perceber nos gráficos *a* e *b* duas células em destaque. Sendo a primeira com frequência de 0,7Hz e amortecimento de 18% e uma segunda célula de frequência 1Hz e amortecimento de 1%.

Pela análise gráfica, pode-se concluir que o método N4SID estimou um modo eletromecânico de frequência 0,7Hz, sendo este comparável na frequência com o modo interárea Sul \times Sudeste.

Para a segunda μ PMU, também foi possível estimar o modo interárea Sul \times Sudeste, porém apenas com a escolha de sinais sem a presença de pequenos transitórios. Assim, apesar de estimar um modos interárea presente no sinal, os resultados não foram conclusivos, o que ressalta os desafios para estimação de modos eletromecânicos empregando dados ambientes reais do sistema.

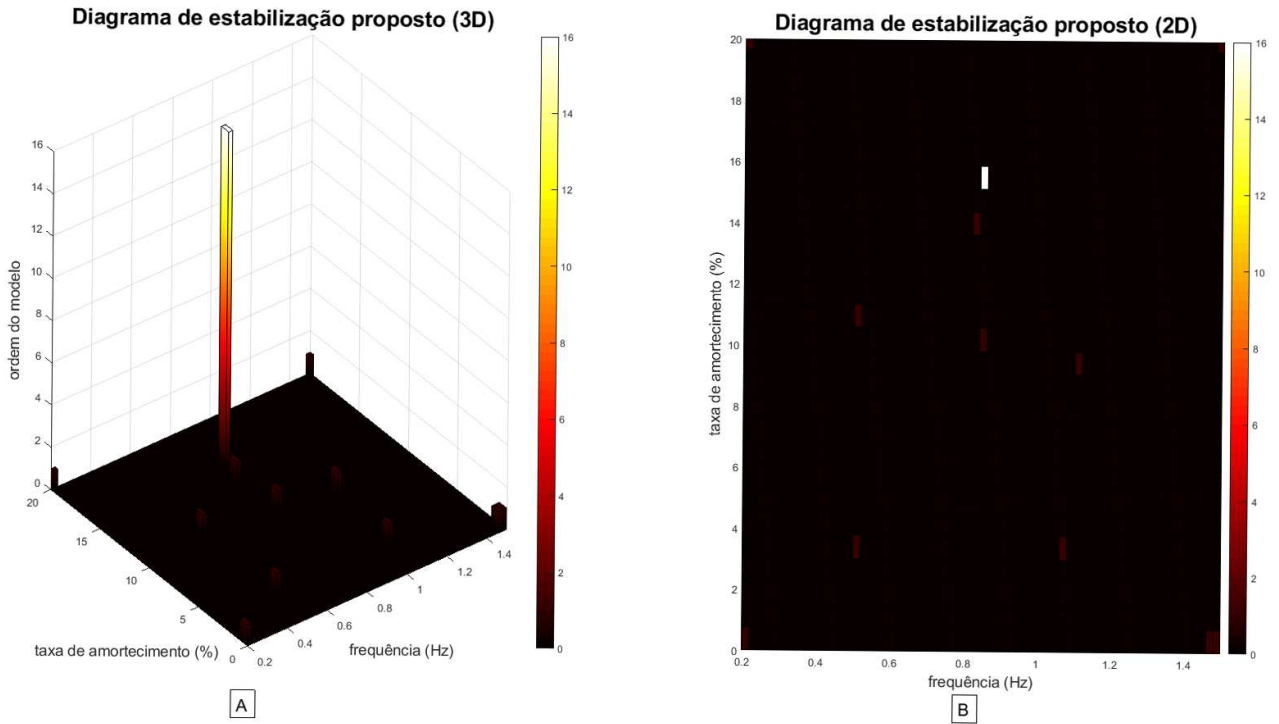


FIGURA 41 – Método YW com ordem máxima 20, data da amostra 30/09/2020 as 17:00

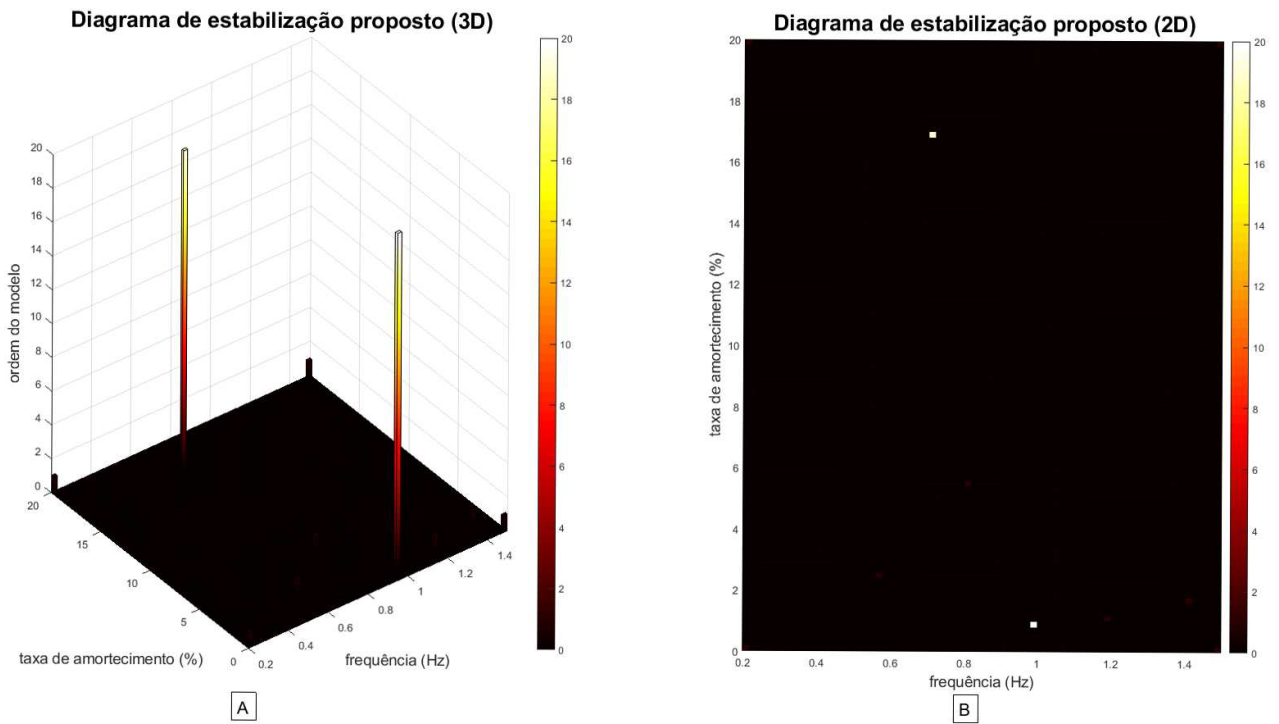


FIGURA 42 – Método N4SID com ordem máxima 20, data da amostra 30/09/2020 as 17:00

CONCLUSÃO

A presente dissertação de mestrado aplicou e comparou o desempenho de dois métodos de decomposição modal, N4SID e YW, junto com uma proposta de adaptação da técnica de diagrama de estabilização para a identificação de modos eletromecânicos de baixa frequência em redes de distribuição com GD em operação ambiente.

O estudo teve início com a implementação dos dois sistemas testes nos programas ANAREDE e ANATEM, sendo também implementado um gerador de número pseudo aleatório para simular o comportamento da operação ambiente da rede de distribuição.

Com a simulação da operação ambiente dos sistemas testes, foi implementado o diagrama de estabilização proposto junto com os métodos de decomposição modal. Nesta fase, foram realizados ajustes em todas as etapas da metodologia empregada. No pré-processamento foi definido a variável de frequência para ser utilizada no processo de estimação, sua taxa de amostragem e ajustados os parâmetros do filtro.

Na etapa de processamento foi definido os parâmetros dos métodos de decomposição modal, como a ordem do modelo estimado e a utilização da versão multi-sinais para o método N4SID e a versão com apenas um sinal para o método YW. A versão multi-sinais do método YW chegou a ser implementada, porém os resultados não foram satisfatórios. O modelo estimado por apenas um sinal mostrou melhores resultados e passou a ser empregada neste trabalho.

Na etapa de pós-processamento, o diagrama de estabilização convencional foi realizado com uma função disponível no software Matlab específica para gerar diagramas de estabilização. Todavia, essa função apresenta apenas a informação da frequência dos modos em seus gráficos. Os diagramas de estabilização em 3D e 2D propostos foram implementados com a frequência e o amortecimento dos modos obtidos dos modelos de ordem reduzida gerados pelo diagrama de estabilização convencional. Os gráficos propostos apresentam as informações da frequência e também do amortecimento dos modos estimados. Assim adaptando essa técnica a realidade da estabilidade do ângulo do rotor sob pequenas perturbações, posto que a informação do amortecimento desses modos é um indicativo da estabilidade do sistema.

Foram propostos três cenários para serem aplicados aos dois sistemas testes, com o objetivo de validar e comparar a performance dos métodos de decomposição modal junto com a técnica de diagrama de estabilização. Em cada um desses cenários foram utilizados janelas de dados de 1, 5, 10, 15 e 20 minutos para a identificação dos modos eletromecânicos. O primeiro cenário investigou a influência da aleatoriedade da carga dos sistemas testes, analisando trinta simulações de respostas ambientes, cada uma estimulada por uma variação de carga distinta. O segundo cenário investigou a influência do ruído de medição no sinal ambiente, para tanto, foi adicionado trinta ruídos branco distintos com potência de 10dB em um conjunto de dados

ambientes. E o terceiro cenário investigou a influência da variação aleatória das cargas e a presença de ruído de medição, adicionando um ruído branco com potência de 10dB em cada uma das trinta respostas ambientes utilizadas no cenário 1.

O primeiro sistema teste analisado foi a rede de distribuição real de 32 barras localizada no interior do estado de São Paulo. Nesse sistema, a proximidade dos geradores síncronos com as principais cargas do sistemas, além do fato desses geradores terem uma potência ativa relevante no suprimento das cargas do sistema, tornaram os modos eletromecânicos mais observáveis nos sinais amostrados da operação ambiente desse sistema.

Nesse primeiro sistema teste ambos os métodos foram capazes de gerar boas estimativas a partir dos sinais amostrados, indicando com clareza a frequência e o amortecimento do modo dominante obtido via modelo conceitual, validando a proposta de diagrama de estabilização para esse cenário. Isso foi notado principalmente no cenário 1 e 2 com ambos os métodos tendo um bom desempenho. No terceiro cenário, a presença de variação aleatória de carga e ruído de medição juntos, teve como efeito um maior espalhamento dos polos estimados, principalmente nas estimativas do amortecimento desses modos, mas mesmo assim, sendo indicado de forma correta a presença do modo dominante. Pode-se notar ainda nesse terceiro cenário, que para janelas maiores de tempo (acima de 10 minutos), o método YW apresentou estimativas mais próximas uma da outras, tornando mais concentrada a incidência de polos nos diagramas de estabilização, assim obtendo um desempenho melhor nesse cenário.

Outra conclusão obtida para o primeiro sistema, é a relação do aparecimento de modos espúrios com frequências elevadas próximas a frequência de corte do filtro, como resultado da filtragem do sinal em seu pré-processamento. Sendo essa questão discutida no ANEXO D.

Para o segundo sistema teste foi empregado uma rede de distribuição de 37 barras, com grande inserção de diferentes tecnologias de GD. Nesse sistema, a presença de geradores síncronos menos relevantes em relação às cargas, sendo essas mais distribuídas pelo sistema teste, estimulou menos os modos eletromecânicos, o que acarretou em um espalhamento maior das estimativas dos polos nos diagramas de estabilização.

Nesse sistema teste é possível notar um melhor desempenho do método YW para todos os cenários, obtendo estimativas melhores do modo dominante do sistema, principalmente para o amortecimento do modo estimado. Mesmo assim, o método N4SID, consegue estimar a frequência desse modo dominante, e em alguns casos também estimando corretamente o amortecimento dos mesmos. O que valida a proposta do diagrama de estabilização também para esse segundo cenário.

A partir dos dois sistemas testes, é possível concluir que janelas de dados maiores que 10 minutos apresentaram melhores resultados na estimação do modo dominante. Isso fica ainda mais evidenciado com os ANEXOS E e F em que pode-se comparar os resultados com janelas de 1 e 15 minutos. Assim, pode-se concluir que a estimação de modos eletromecânicos,

a partir da operação ambiente dos sistemas testes 1 e 2, necessitam de janelas maiores que 5 minutos para que os métodos de decomposição modal possam extrair as informações dos sinais amostrados.

À vista disso, a proposta de diagrama de estabilização deste trabalho de mestrado, junto com os métodos de decomposição modal, cumprem com o objetivo de estimar o modo dominante presente nos sistemas testes. Trazendo uma análise fácil e intuitiva para o operador do modo dominante presente na operação ambiente do sistema.

Já a tarefa de estimação de modos eletromecânicos em dados reais, coletados por μ PMU, se mostrou nada trivial. Apesar do algoritmo proposto ter funcionado bem para os sistemas testes simulados computacionalmente, quando utilizados dados reais a tarefa se mostrou mais dificultosa. As interações entre os diversos elementos que compõem a rede podem não ser completamente consideradas nas simulações computacionais dos sistemas testes, e geram dinâmicas que dificultam o processo de estimação modal.

Mesmo assim, foi possível estimar a presença de modos interárea presentes nos sinais coletados por μ PMU, tendo os diagramas de estabilização 3D e 2D indicando a presença dos modos Norte \times Sul e Sul \times Sudeste.

Destaca-se a necessidade dos sinais coletados por μ PMU serem re-amostrados para obtenção dos resultados apresentados, utilizando uma taxa de 12 amostras por segundo, ao invés das 120 amostras por segundo medidas pelas μ PMU. Além disso, janelas dados de 5 minutos (3600 amostras) se mostraram insuficientes para obtenção de boas estimativas. Verificou-se assim, que janelas de 10 e 15 minutos (7200 e 10800 amostras respectivamente) se mostraram mais apropriadas para o processo de estimação modal.

Com isso, verifica-se a necessidade de continuar os estudos para a estimação de modos eletromecânicos de baixa frequência, utilizando dados reais coletados de redes de distribuição com GD em operação ambiente para trabalhos futuros. Tendo em vista a tendência de crescimento da quantidade de GD e do número de μ PMU utilizadas em redes de distribuição, pode-se pensar ainda como trabalhos futuros, a implementação de um algoritmo para estimação de modos eletromecânicos em tempo real. Para que se possa acompanhar as dinâmicas desses modos durante a operação do sistema, ajudando na tomada de decisões por parte do operador caso esses modos eletromecânicos se tornem pouco amortecidos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. V. L. de. **Análise do Desempenho Dinâmico de Geradores Síncronos Conectados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. 2005. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas. Citado 1 vez nas páginas 54–56, 100–102.
- ALLEN, A. J.; SOHN, S. W.; GRADY, W. M.; ... Validation of distribution level measurements for power system monitoring and low frequency oscillation analysis. In: 2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications. [S.l.]: ieeexplore.ieee.org, 2012. P. 1–5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6316392/>. Citado 1 vez na página 29.
- AUWERAER, H. V. D.; PEETERS, B. Discriminating Physical Poles from Mathematical Poles in High Order Systems : Use and Automation of the Stabilization Diagram. In: PROCEEDINGS of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. [S.l.: s.n.], 2004. P. 2193–2198. ISBN 078038248X. Citado 4 vezes nas páginas 22, 46, 47.
- CEPEL. **Anatem Version 11.04 - User's Manual**. [S.l.: s.n.], 2018. Citado 0 vezes nas páginas 100–102.
- CHEN, C.-T. **Linear System Theory and Design**. [S.l.: s.n.], 1999. Citado 1 vez na página 33.
- DECKER, I. C.; SILVA, A. S. e.; AGOSTINI, M. N.; ... Experience and applications of phasor measurements to the Brazilian interconnected power system. . . . **on Electrical Power**, Wiley Online Library, 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/etep.537>. Citado 1 vez na página 20.
- DOSIEK, L.; ZHOU, N.; PIERRE, J. W.; MEMBER, S.; HUANG, Z.; MEMBER, S.; TRUDNOWSKI, D. J. Mode Shape Estimation Algorithms Under Ambient Conditions: A Comparative Review. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, n. 2, p. 779–787, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 38, 43, 44.
- EDWARDS, F. V.; DUDGEON, G.; MCDONALD, J.; LEITHEAD, W. Dynamics of Distribution Networks with Distributed Generation. In: 2000 Power Engineering Society Summer Meeting. [S.l.: s.n.], 2000. v. 02, p. 1032–1037. ISBN 0780364201. DOI: 10.1109/PESS.2000.867515. Citado 1 vez na página 21.
- FERNANDES, T. C. C. **Aplicação de Técnicas de Estimacão Modal para Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações de Sistemas de Distribuição com Geração Distribuída**. 2012. Tese (Doutorado). Citado 1 vez na página 37.

- FERNANDES, T. C. C.; JR, E. L. G.; PATACA, L. C. Modal estimation in distributed synchronous generation systems under three-phase unbalanced conditions. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 152, p. 350–356, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779617303085>. Citado 5 vezes nas páginas 21, 22, 29.
- JAMALUDIN, I. W.; WAHAB, N. A.; KHALID, N. S.; SAHLAN, S.; IBRAHIM, Z.; RAHMAT, M. F. N4SID and MOESP Subspace Identification Methods. **2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications**, IEEE, n. 3, p. 140–145, 2013. DOI: 10.1109/CSPA.2013.6530030. Citado 1 vez na página 38.
- JINGMIN, N.; CHEN, S.; FENG, L. Estimating the electromechanical oscillation characteristics of power system based on measured ambient data utilizing stochastic subspace method. In: 2011 IEEE Power and Energy society general meeting. [S.l.]: ieeexplore.ieee.org, 2011. P. 1–7. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6038918/>. Citado 6 vezes nas páginas 22, 23, 38, 40, 46.
- KONTIS, E. O.; PAPADOPOULOS, L. A.; BARZEGKAR-NTOVOM, G. A.; CHRYSOCHOS, A. I.; PAPAGIANNIS, G. K. Modal analysis of active distribution networks using system identification techniques. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 100, p. 365–378, 2018. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.02.038. Citado 6 vezes nas páginas 21, 24, 38, 73–76, 103–105.
- KUIAVA R RAMOS, B. M. Algorithm for the Estimation of Electromechanical Modes Via Modal Decomposition Techniques. **IEEE Latin America Transactions**, v. 15, n. 6, p. 1060–1067, 2017. DOI: 10.1109/TLA.2017.7932693. Citado 2 vezes nas páginas 20, 36.
- KUIAVA, R.; RAMOS, R. A.; OLIVEIRA, R. V. D.; BRETAS, N. G. An Analysis of the Potential Impacts of Electromechanical Oscillations on the Stability and Power Quality of Distributed Generation Systems. In: 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting–Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. [S.l.: s.n.], 2008. P. 1–7. Citado 12 vezes nas páginas 19–21, 24, 28, 29, 40, 58.
- KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. [S.l.: s.n.], 1994. Citado 12 vezes nas páginas 18, 19, 27, 28, 30, 31, 33.
- KUNDUR P, B. A. Definition and Classification of Power System Stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 2, p. 1387–1401, 2004. Citado 11 vezes nas páginas 18, 19, 26–28.
- LEANDRO, R.; JEREMIAS, T.; DECKER, I.; SILVA, A.; AGOSTINI, M. Monitoramento on-line de oscilações eletromecânicas no SIN utilizando sincrofasores. May, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 41, 85.

LEANDRO, R. B.; SILVA, A. S. e; DECKER, I. C.; AGOSTINI, M. N. Identification of the Oscillation Modes of a Large Power System Using Ambient Data. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Springer US, v. 26, n. 4, p. 441–453, 2015. ISSN 21953899. DOI: 10.1007/s40313-015-0187-1. Citado 15 vezes nas páginas 20, 22, 30, 38–40, 45, 46, 54.

MEIER, A. V. Micro-Synchrophasors for Distribution Systems. **ISGT 2014**, IEEE, p. 1–5, 2014. DOI: 10.1109/ISGT.2014.6816509. Citado 2 vez na página 35.

MRABET, E.; ABDELGHANI, M.; KAHLA, N. B. A New Criterion for the Stabilization Diagram Used with Stochastic Subspace Identification Methods : An Application to an Aircraft Skeleton. **Shock and Vibration**, v. 2014, n. 1, p. 1–8, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 22, 46–48.

OVERSCHEE, P. V.; MOOR, B. D. **Subspace Identification for Linear Systems**. [S.l.: s.n.], 1996. Citado 2 vezes nas páginas 40, 41.

PARK, S. K.; MILLER, K. W. Random number generators: good ones are hard to find. **Communications of the ACM**, Association for Computing Machinery, Inc., v. 31, n. 10, p. 1192–1202, out. 1988. ISSN 00010782. Citado 1 vez na página 106.

PATACA, L. C. **Identificação Modal a partir de Dados Ambientes em Sistemas com Geração Síncrona Distribuída**. 2015. Tese (Doutorado). Citado 5 vezes nas páginas 18, 28, 29, 38, 106.

PHADKE, A. G. Synchronized phasor measurements A historical overview -. In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 476–479. ISBN 0780375254. Citado 2 vezes nas páginas 20, 35.

PHILLIPS, A. W.; ALLEMANG, R. J. Additional Mechanisms for Providing Clear Stabilization (Consistency) Diagrams. **Noise and Vibration Engineering**, 2008. Citado 1 vez na página 23.

PIERRE, J. W. Initial results in electromechanical mode identification from ambient data. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 12, n. 3, p. 1245–1251, 1997. ISSN 08858950. DOI: 10.1109/59.630467. Citado 1 vez na página 38.

POLEDNA, Y.; PEREIRA, J. L.; RIBEIRO, E. P. Network traffic analysis of micro PMU communication at university campus. **2019 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)**, IEEE, Wcnps, p. 1–4, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 35, 83.

PRIOSTE, F. B.; SILVA, A. S. e; DECKER, I. C. Monitoring oscillations modes of the Brazilian Interconnected Power System using ambient data. **2011 IEEE trondheim . . .**, ieeexplore.ieee.org, 2011. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6019317/>. Citado 4 vezes nas páginas 24, 46, 57, 85, 106.

RAMOS, B. M. **Algoritmo para Identificação de Modos Eletromecânicos de baixa Frequência no contexto da Geração Distribuída**. 2016. Tese (Doutorado). ISBN 9788578110796. DOI: 10.1017/CB09781107415324.004. arXiv: arXiv:1011.1669v3. Citado 1 vez na página 36.

ROGERS, G. **Power System Oscillations**. [S.l.: s.n.], 2000. Citado 8 vezes nas páginas 18–20, 27, 28.

SALIM, R. H.; KUIAVA, R.; RAMOS, R. A.; ... Impact of power factor regulation on small-signal stability of power distribution systems with distributed synchronous generators. **European Transactions on Electrical Power**, Wiley Online Library, v. 21, n. 7, p. 1923–1940, 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/etep.504>. Citado 5 vezes nas páginas 21, 22, 29.

SCHUMACHER, R.; OLIVEIRA, G. H.; KUIAVA, R. A multi-signal instrumental variable vector fitting method for estimating inter-area electromechanical modes of power systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, Elsevier, v. 111, September 2018, p. 1–13, 2019. ISSN 01420615. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.03.037. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.03.037>. Citado 1 vez na página 36.

STOICA, P.; MOSES, R. **Introduction to Spectral Analysis**. [S.l.: s.n.], 1997. P. 103–106. Citado 1 vez na página 44.

THAMBIRAJAH, B. T. Comparative review of methods for stability monitoring in electrical power systems and vibrating structures. **IET Generation, Transmission & Distribution**, IET, v. 4, n. 10, p. 1086–1103, 2010. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2009.0485>. Citado 12 vezes nas páginas 21, 26, 35–38, 46.

TRUDNOWSKI, D. J.; PIERRE, J. W. Overview of algorithms for estimating swing modes from measured responses. In: 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. [S.l.]: ieeexplore.ieee.org, 2009. P. 1–8. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5275444/>. Citado 9 vezes nas páginas 21, 24, 28, 34, 35, 37, 38, 40.

TRUDNOWSKI, D. J. Estimating Electromechanical Mode Shape From Synchrophasor Measurements. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 23, n. 3, p. 1188–1195, 2008. Citado 14 vezes nas páginas 21, 22, 28, 30, 37, 38, 43–46.

VON MEIER, A.; CULLER, D.; MCEACHERN, A.; ARGHANDEH, R. Micro-synchrophasors for distribution systems. **2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2014**, IEEE, p. 1–5, 2014. DOI: 10.1109/ISGT.2014.6816509. Citado 1 vez na página 35.

WELCH, P. D. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. **IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics**, v. 15, n. 2, p. 70–73, 1967. Citado 1 vez na página 37.

WIES, R. W.; PIERRE, J. W.; MEMBER, S.; TRUDNOWSKI, D. J.; MEMBER, S. Use of ARMA Block Processing for Estimating Stationary Low-Frequency Electromechanical Modes of Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 18, n. 1, p. 167–173, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 34, 38.

WU, C.; LIU, H.; QIN, X.; WANG, J. Stabilization diagrams to distinguish physical modes and spurious modes for structural parameter identification. **Journal of Vibroengineering**, v. 19, n. 4, p. 2777–2794, 2017. ISSN 13928716. DOI: 10.21595/jve.2017.17629. Citado 2 vezes nas páginas 45, 109.

ZHOU, N.; PIERRE, J. W.; TRUDNOWSKI, D. J.; MEMBER, S.; GUTTROMSON, R. T.; MEMBER, S. Robust RLS Methods for Online Estimation of Power System Electromechanical Modes. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 22, n. 3, p. 1240–1249, 2007. Citado 1 vez na página 37.

ZIBETTI, E.; KUIAVA, R.; HENRIQUE, G.; ANDRÉ, O. Aplicação de Diagramas de Estabilização para a Identificação de Dinâmicas Oscilatórias Eletromecânicas a partir da Estimação Modal em Sinais de microPMU 's, 2011. Citado 1 vez na página 23.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – MODELOS DINÂMICOS DOS GERADORES E MALHAS DE CONTROLE - SISTEMA TESTE 1

Neste anexo são apresentados os modelos dinâmicos e os parâmetros do gerador síncrono, além dos modelos e parâmetros do regulador de velocidade e do regulador de tensão que foram considerados na simulação da operação ambiente do sistema teste 1.

1.1 MODELO DINÂMICO DO GERADOR

Os modelos dos geradores utilizados representam uma máquina síncrona de rotor liso com um enrolamento de campo e três enrolamentos amortecedores, sendo um no eixo direto e dois no eixo em quadratura, conforme diagrama de blocos da figura 43. Os valores das constantes de tempo e parâmetros dos geradores são apresentados nas tabelas 9 10.

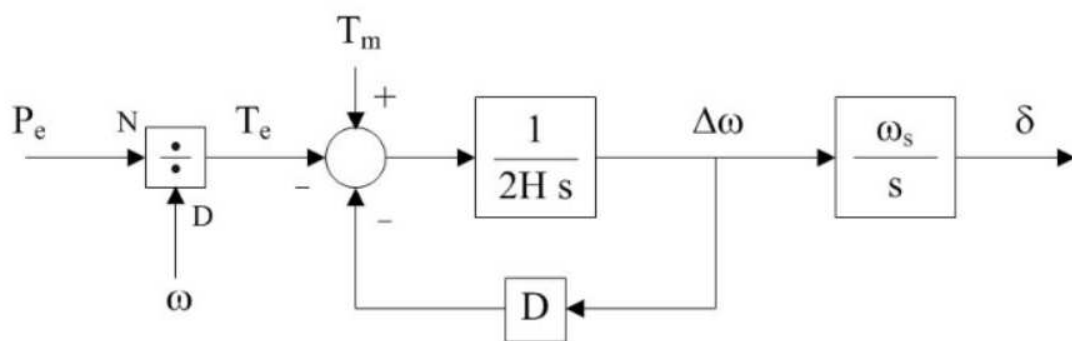


FIGURA 43 – Gerador Síncrono de rotor liso

Fonte: – (CEPEL, 2018)

Constantes de tempo (s)					
		G1	G2	DG	G3
T'_{d}	Transitório do eixo direto	7,8	0,066	3,0	0,075
T''_{d}	Sub transitório do eixo em direto	7,8	0,066	3,0	0,075
T'_{q}	Transitório de eixo em quadratura	7,8	0,066	3,0	0,075
T''_{q}	Sub transitório de eixo em quadratura	7,8	0,066	3,0	0,075

TABELA 9 – constantes de tempo

Fonte: – (ABREU, 2005)

1.2 REGULADOR DE VELOCIDADE

O modelo de regulador de velocidade considera um modelo simplificado de turbina a vapor, figura 44. O modelo utilizado relaciona o efeito do regulador de velocidade com a dinâmica da turbina a vapor com reaquecimento.

Parâmetros		G1	G2	DG	G3
S	Potência nominal (MVA)	1,5	3,5	3,5	3,5
V	Tensão nominal (kV)	13,8	13,8	13,8	2,4
H	Constante de inércia (s)	1,00	1,00	1,00	1,00
x _d	Reatância de eixo direto	206,0	195,0	206,0	187,0
x' _d	Reatância transitória de eixo direto	39,8	25,0	38,9	17,6
x'' _d	Reatância sub transitória de eixo direto	25,4	19,0	25,4	14,6
x _q	Reatância de eixo em quadratura	250,0	213,0	250,0	213,0
x' _q	Reatância transitória de eixo em quadratura	30,0	30,0	30,0	30,0

TABELA 10 – Gerador Síncrono de polos lisos

Fonte: – (ABREU, 2005)

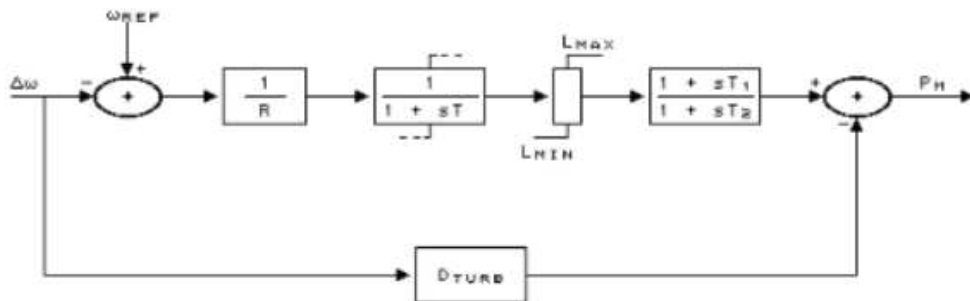


FIGURA 44 – Modelo do regulador de velocidade

Fonte: – (CEPEL, 2018)

A tabela 11 apresenta os parâmetros utilizados para o regulador de velocidade. Onde temos R_v sendo o estatismo da máquina, T a constante de tempo do Regulador, e T_2 a constante de tempo de reaquecimento da turbina, L_{min} e L_{max} é o limite inferior e superior do regulador em pu.

Dados	G1	G2	DG	G3
R_v (pu.)	0,05	0,05	0,05	0,05
T (s)	0,05	0,05	0,05	0,05
T_1 (s)	1,5	1,5	1,5	1,5
T_2 (s)	5,0	5,0	5,0	5,0
L_{min} (pu.)	0,1	0,2	0,2	0,2
L_{max} (pu.)	1,1	1,1	1,1	1,1

TABELA 11 – Parâmetros regulador de velocidade

Fonte: – (ABREU, 2005)

1.3 REGULADOR DE TENSÃO

O regulador de tensão utilizado está representado pelo diagrama de blocos da figura 45.

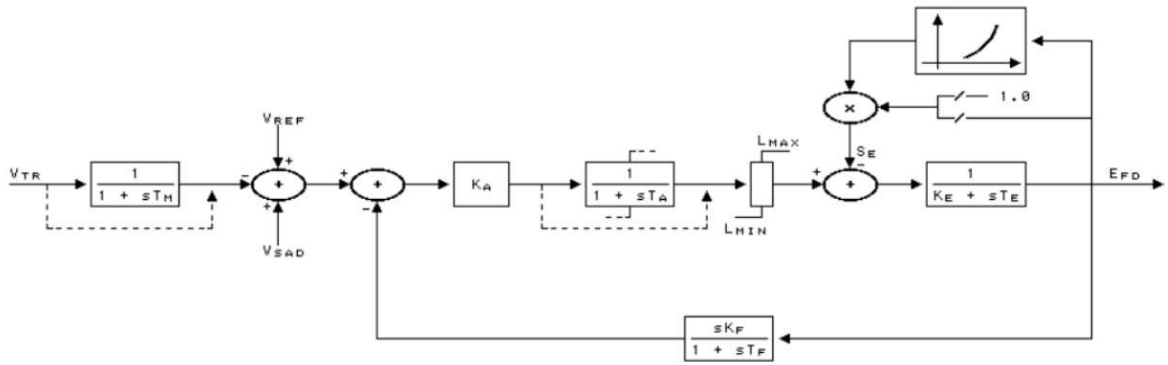


FIGURA 45 – Modelo do regulador de tensão

Fonte: – (CEPEL, 2018)

Na tabela 12, temos os parâmetros utilizados para o regulador de tensão. Está sendo utilizado a curva de saturação padrão do programa Anaten.

Dados	G1/G2/DG/G3
Ka	120
Ke	1
Kf	0,05
Tm	0 0
Ta	0,15
Te	0,5
Tf	1

TABELA 12 – regulador de tensão

Fonte: – (ABREU, 2005)

APÊNDICE 2 – MODELOS DINÂMICOS DOS GERADORES E MOTORES DE INDUÇÃO - SISTEMA TESTE 2

2.1 MODELO DINÂMICO DO GERADOR

Os geradores neste sistema teste são representados por um modelo de máquina síncrona de polos salientes, com um enrolamento de campo e dois enrolamentos amortecedores, sendo um no eixo direto e outro no eixo em quadratura, conforme diagrama de blocos da figura 46.

Os parâmetros e as constantes de tempo associadas ao gerador síncrono são apresentadas nas tabelas.

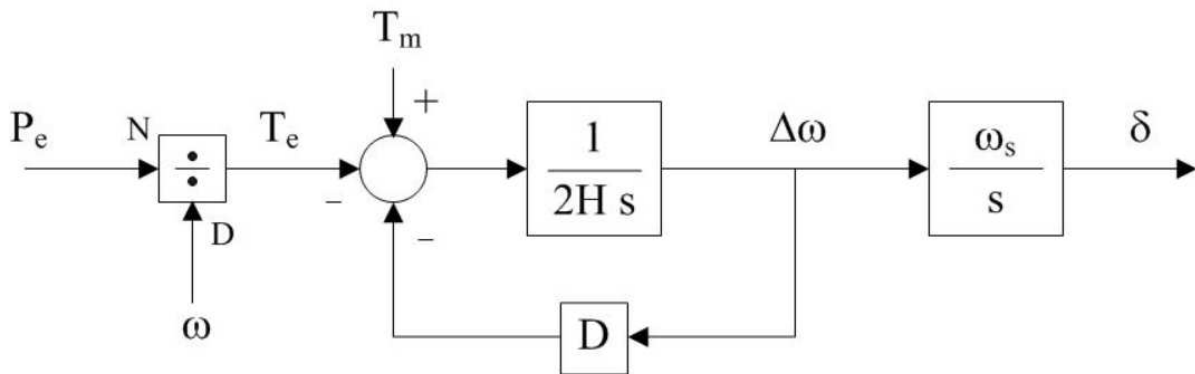


FIGURA 46 – Modelo de máquina síncrona de polos salientes

Constantes de tempo (s)		SG1 / SG2 / SG3 / SG4
T'_{d}	Transitório do eixo direto	1,8
T''_{d}	Sub transitório do eixo em direto	0,035
T''_{q}	Sub transitório de eixo em quadratura	0,07

TABELA 13 – Constantes de tempo do gerador síncrono sistema teste 2

Fonte: – (KONTIS et al., 2018)

2.2 MODELO GERADOR EÓLICO

O gerador eólico é representado por uma máquina de indução com dupla alimentação. Os parâmetros utilizados para simulação são apresentados na tabela

2.3 MOTORES DE INDUÇÃO

Os motores de indução são cargas dinâmicas que também podem ter influencia no comportamento dos modos eletromecânicos. O emprego destas cargas dinâmicas neste sistema

Parâmetros		SG1 / SG2 / SG3 / SG4
S	Potência nominal (MVA)	1,65
V	Tensão nominal (kV)	20
H	Constante de inércia (s)	4,00
X _d	Reatância de eixo direto (%)	100
X' _d	Reatância transitória do eixo direto (%)	35
X'' _d	Reatância sub transitória do eixo direto (%)	20
X _q	Reatância de eixo em quadratura (%)	65
X _i	Reatância de dispersão de armadura (%)	10

TABELA 14 – Parâmetros síncronos de polos salientes Sistema teste 2

Fonte: – (KONTIS et al., 2018)

Parâmetro		Valores
S	Potência base de 1 unidade (HP)	8837,00
R _s	Resistência do estator (%)	1,30
X _s	Reatância do estator (%)	14,00
X _m	Reatância de magnetização (%)	240,00
R _r	Resistência do rotor (%)	0,90
X _r	Reatância do rotor	12,00
H	Constante de tempo do conjunto gerador / turbina (s)	0,214
X _{trf}	Reatância do transformador do conversor ligado ao estator (%)	0,008
S _{trf}	Potência base do transformador do conversor ligado ao estator (MVA)	0,6

TABELA 15 – Parâmetros do gerador de indução com dupla alimentação sistema teste 2

Fonte: – (KONTIS et al., 2018)

teste teórico, busca melhor representar a proximidade das cargas com redes de distribuição. Abaixo tabela com os parâmetros dos 18 motores de indução considerados e a barra em que cada qual está acoplado.

Barra	Potência (HP)	H	R _s	X _s	X _m	R _r	X _r
12	474		3,1	10,0	320,0	1,8	18,0
13	337		1,3	14,0	240,0	0,9	12,0
14	98		7,7	1,1	220,0	7,9	9,8
15	474		3,1	10,0	320,0	1,8	18,0
16	474		3,1	10,0	320,0	1,8	18,0
17	472		1,3	6,7	380,0	0,9	12,0
18	524		1,3	14,0	240,0	0,9	12,0
19	365		3,5	9,4	280,0	4,8	16,3
20	661		6,4	9,1	223,0	5,9	7,1
23	94		3,1	10,0	320,0	1,8	18,0
24	112		1,3	14,0	240,0	0,9	12,0
25	98		7,7	10,7	222,0	7,9	9,8
26	576		1,3	6,7	380,0	0,9	12,0
27	112		1,3	14,0	240,0	0,9	12,0
32	524		1,3	14,0	240,0	0,9	12,0
33	250		7,7	10,7	222,0	7,9	9,8
34	365		3,5	9,4	280,0	4,8	16,3
37	661		6,4	9,1	223,0	5,9	7,1

TABELA 16 – Motores de indução sistema teste 2

Fonte: – (KONTIS et al., 2018)

APÊNDICE 3 – GERADOR DE NÚMEROS PSEUDO ALEATÓRIOS

Buscando representar o comportamento aleatório da operação ambiente dos SEP, é implementado um gerador de números pseudo aleatórios consolidado na literatura, proposto em (PARK; MILLER, 1988), conhecido como *minimal standard generator*. O algoritmo utilizado já foi implementado com o mesmo propósito em estudos da operação ambiente de SEP (PRIOSTE et al., 2011), (PATACA, 2015), para gerar variações aleatórias de carga ao longo do tempo em simulações da operação dinâmica dos sistemas testes.

Um gerador de número aleatórios deve ser capaz de gerar uma sequência de números teoricamente infinita, sendo esses números estatisticamente independentes e uniformemente distribuídos entre 0 e 1. Esse é o ponto central para obtenção de números aleatórios, pois sequências "estranhas" ou "imprevisíveis" não são necessariamente aleatórias. O algoritmo utilizado atende os critérios para uma sequência aleatória, mas é chamado de pseudo aleatório por se tratar de uma sequência finita e periódica de números.

O gerador de número pseudo aleatório empregado é capaz de produzir uma sequência periódica a cada $2^{(31)} - 1$ (2147483647) elementos, a partir da função apresentada abaixo:

$$f(z) = 7^5 z \text{ mod}(2^{(31)} - 1) \quad (3.1)$$

em que o operador mod indica pegar o resto da divisão de $7^5 z$ por $2^{(31)} - 1$.

Assim, normalizando o resultado por $2^{(31)} - 1$ obtemos uma sequência de número aleatórios entre 0 e 1. Outro ponto importante a respeito dessa função é que ela depende de um número inicial (semente inicial) para gerar a sequência de números, sementes iniciais diferentes geram sequências aleatórias diferentes, essa característica é utilizada para gerar diferentes variações de carga nos cenários de estudos propostos.

O algoritmo é apresentado a seguir:

Constantes

$a=16807; 7^5$

$m=2147483647; (2^{(31)} - 1)$

$q= 127773; (q = m/a$

$r= 2836; (r = (m)mod(a))$

Seed= semente inicial definida pelo usuário;

for $i = 1 \rightarrow$ **do**

$hi = Trunc(seed/q);$

$lo = seed - q * hi;$

$test = a * lo - r * hi$

if $test > 0,0$ **then**

$seed = test;$

else

$seed = test + m;$

$Randon = seed/m;$

end if

end for

O algoritmo foi implementado através de uma CDU (Controlador definido pelo usuário) no programa ANATEM. A sequência pseudo aleatória gerada apresenta uma média de valores que tendem a 0,5, no programa Anatem essa média é subtraída, assim obtemos variações de carga apenas sobre os valores nominais da carga.

Para exemplificar o funcionamento do algoritmo é apresentado a variação de carga na barra 12 do segundo sistema teste, utilizando duas sementes iniciais quaisquer diferentes, Figura 47. Esta barra tem uma carga com potência ativa e reativa de 0,320MW e 0,015MVA respectivamente. Considerando uma variação entre +/- 10% a variação de carga da potência ativa desse barramento deverá ficar entre 0,288 e 0,352MW. Destaca-se que, considerando sementes iniciais diferentes, uma variação distinta de carga é gerada.

As pequenas variações aleatórias de carga geradas estimulam os modos eletromecânicos e se refletem nas variáveis eletromecânicas da rede. Na Figura 48 tem-se o sinal da frequência da barra 03, onde os geradores síncronos estão conectados. Nota-se que variações diferentes da carga no barramento 12 resultaram em respostas distintas na frequência do barramento 03, Figura 48.

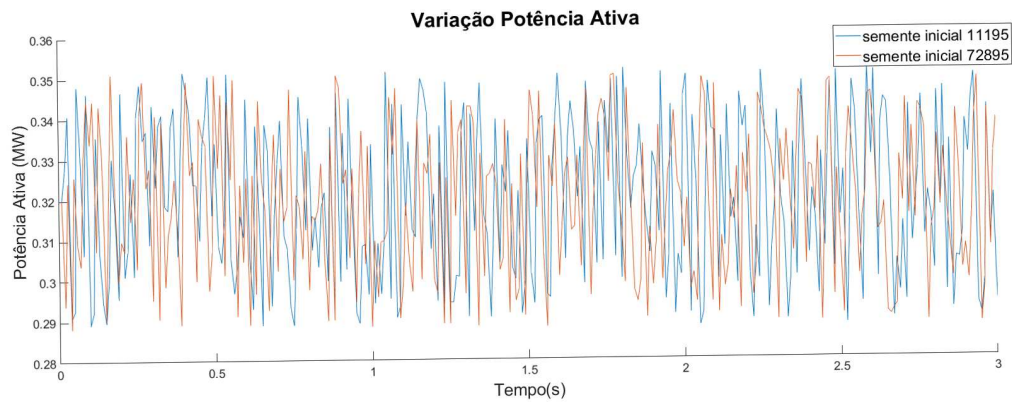


FIGURA 47 – Variação da potência ativa da barra 12, sistema teste 2, com sementes iniciais diferentes

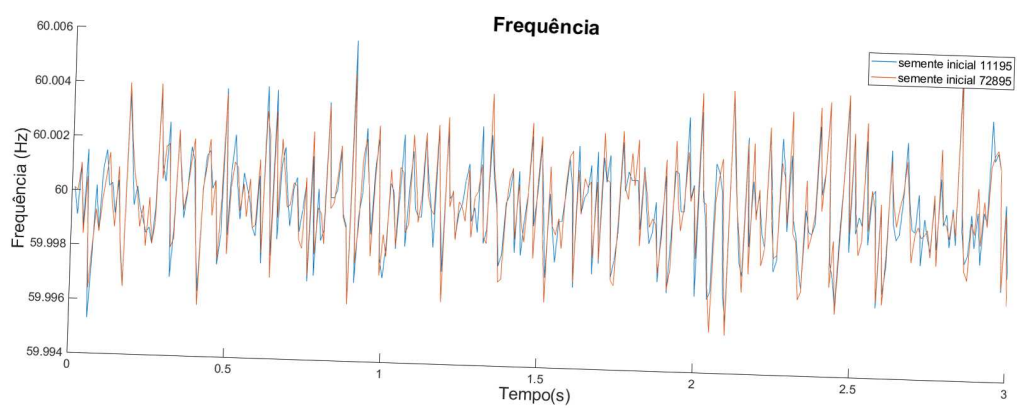


FIGURA 48 – Variação da frequência da barra 12, sistema teste 2, com sementes iniciais diferentes

APÊNDICE 4 – ANÁLISE DO PROCESSO DE FILTRAGEM COM MODOS ESPÚRIOS

O processo de filtragem do sinal amostrado atenua as componentes do sinal fora da faixa de interesse do estudo das oscilações eletromecânicas de baixa frequência, porém, em alguns casos pode estar associado também ao aparecimento de modos espúrios nos modelos estimados pelos métodos de decomposição modal (WU et al., 2017). Esse fenômeno pôde ser observado principalmente em algumas estimativas geradas pelo YW.

Este anexo tem como objetivo investigar se os modos estimados pelos métodos de decomposição modal, localizados próximos a frequência de corte do filtro empregado, $f_c = 8Hz$, estão associados ao processo de filtragem. Essa análise é realizada aumentando ou diminuindo gradativamente a frequência de corte do filtro e observando o comportamento dos modos próximos a frequência de corte.

Para exemplificar a análise é tomando o resultado obtido para o método YW, com uma janela de dados de 20 minutos no primeiro cenário do primeiro sistema teste, Figura 49. Esta sendo utilizado um filtro passa baixa *Chebyshev* tipo II de ordem 6 e frequência de corte de 8Hz. Nota-se pelos diagramas propostos a incidência de dois modos com frequência próxima a 2 e 7,4Hz. Para a análise em questão atendo-se ao segundo conjunto de células com frequência de 7,4Hz.

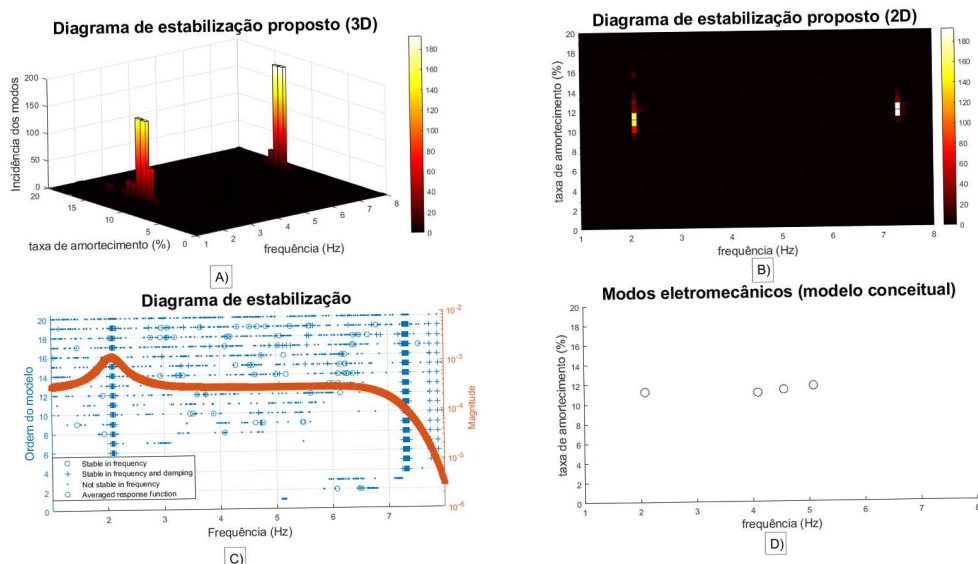


FIGURA 49 – Método YW, frequência de corte do filtro 8Hz.

Utilizando os mesmos parâmetros utilizados para a estimação do resultado anterior, a frequência de corte do filtro é alterada para 8,5Hz, Figura 50. Também com dois conjuntos de células com maior incidência, mas agora, o segundo conjunto de células apresenta uma

frequência de 7,8Hz.

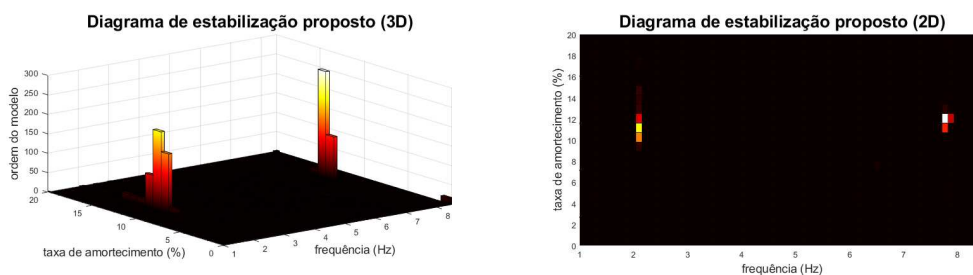


FIGURA 50 – Método YW, frequência de corte do filtro 8,5Hz

Diminuindo a frequência de corte do filtro para 7,5Hz, pode-se notar que a frequência do segundo conjunto de células diminui para 6,9Hz, Figura 51.

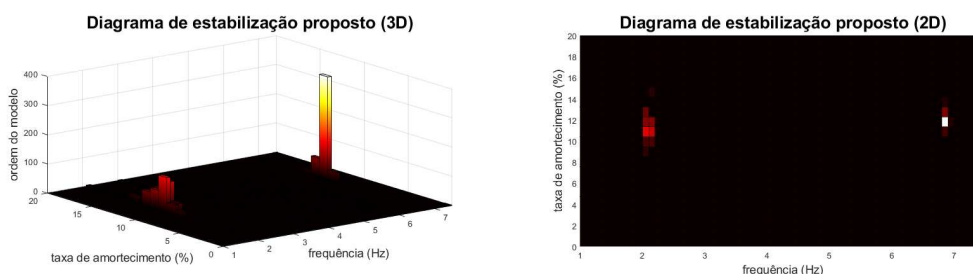


FIGURA 51 – Método YW, frequência de corte do filtro 7,5Hz

Para frequências de corte de 7 e 6,5Hz, Figuras 52 e 53 respectivamente, a incidência de polos próximos a frequência de corte do filtro ocorrem em 6,5 e 6Hz.

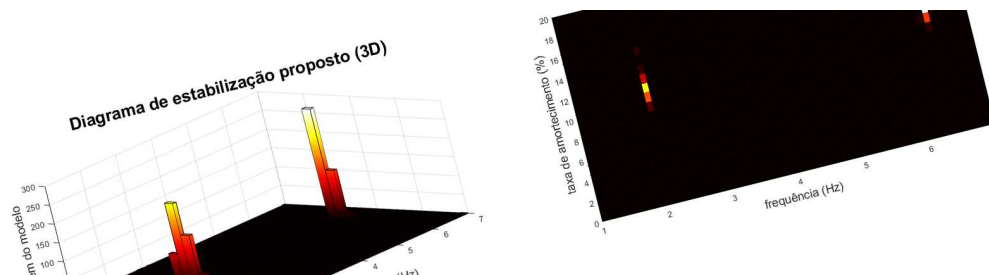


FIGURA 52 – Método YW, frequência de corte do filtro 7Hz

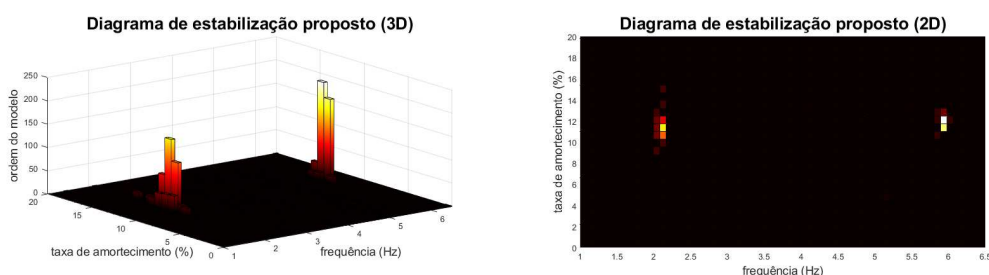


FIGURA 53 – Método YW, frequência de corte do filtro 6,5Hz

Analisando os gráficos anteriores é possível perceber que o primeiro conjunto de células esteve sempre localizado em frequências próximas a 2Hz. Já o segundo conjunto de células esteve sempre localizado em frequências entre 0,5 e 0,6Hz abaixo da frequência de corte do filtro, sendo um forte indício de que esse segundo agrupamento de células seja resultado do processo de filtragem realizado na etapa de pré-processamento.

APÊNDICE 5 – DEMAIS RESULTADOS DO SISTEMA TESTE 1

No presente anexo é apresentado os resultados para o primeiro sistema teste, dos métodos YW e N4SID, com janelas de dados de 15 e 1 minutos. Esses resultados complementam os estudos realizados na seção de testes e resultados.

Para o primeiro cenário as Figuras 54 e 55 apresentam os resultados para os métodos YW e N4SID respectivamente, utilizando janelas de dados de 15 minutos. Com base na incidência de polos nas células dos diagramas, pode-se concluir que ambos os métodos estimaram um modo eletromecânico de frequência de 2,1Hz e amortecimento de 11%.

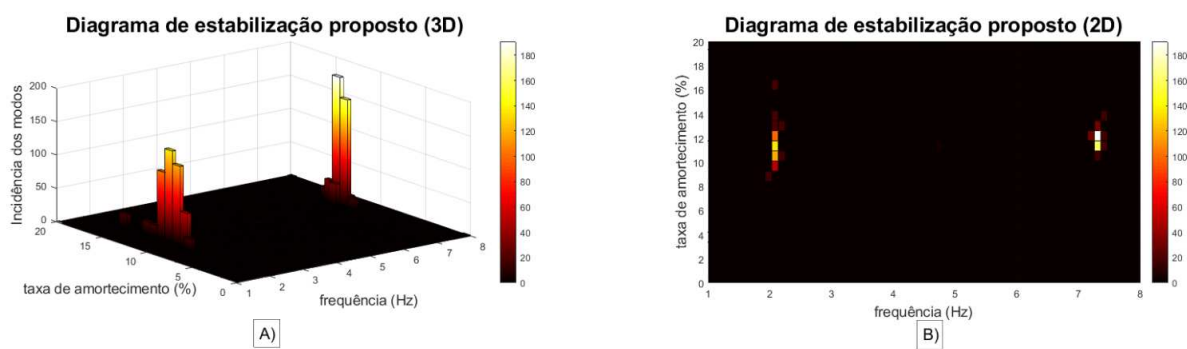


FIGURA 54 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 15 minuto de janela de dados.

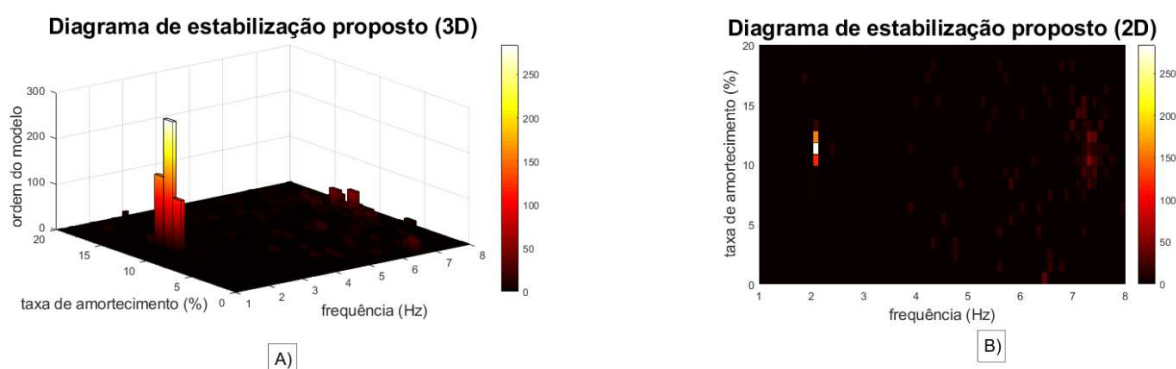


FIGURA 55 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 15 minuto de janela de dados.

Já os resultados com janela de dados de 1 minuto dos métodos YW e N4SID, são apresentados na sequência das Figuras 56 e 57. É possível concluir que o método YW não conseguiu estimar o modo dominante presente no sistema. Já no método N4SID, nota-se um agrupamento de células que indica a estimação de um modo eletromecânico de frequência 2,1Hz, no entanto, o método não consegue estimar com clareza o amortecimento desse modo.

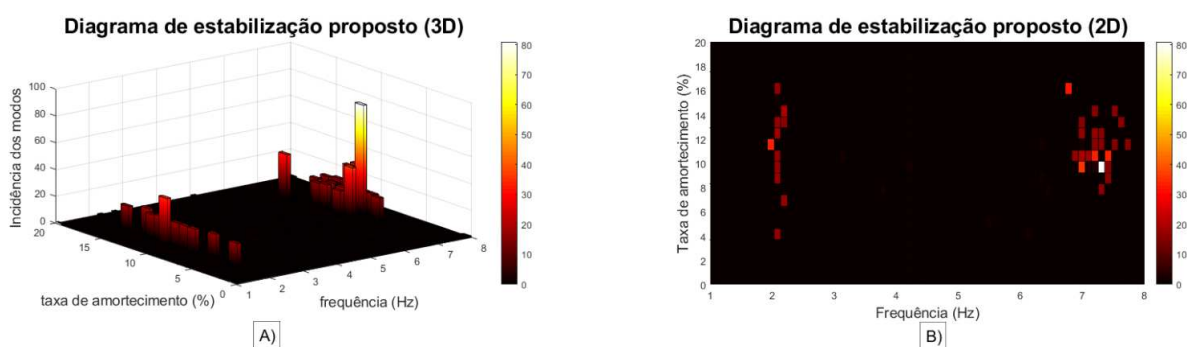


FIGURA 56 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 1 minuto de janela de dados.

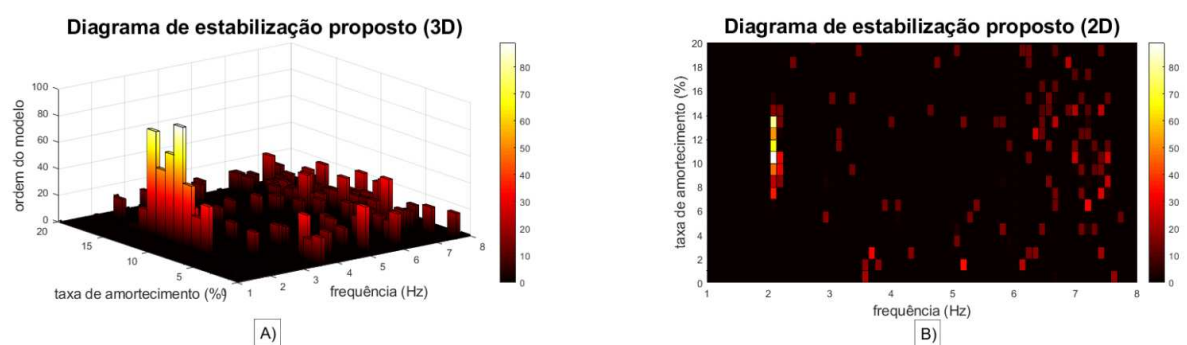


FIGURA 57 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 1 minuto de janela de dados.

Com esse primeiro cenário pode-se concluir que com janelas de dados de 15 minutos ambos os métodos estimaram com precisão o modo dominante presente no sistema. Destaca-se ainda a piora na qualidade das estimativas de ambos os métodos para janelas de dados de 1 minuto. O que evidência a necessidade de uma quantidade de dados suficiente para que os métodos de decomposição modal consigam extrair as informações dos modos eletromecânicos dos sinais amostrados da operação ambiente do sistema.

Passando para o segundo cenário, são apresentados os resultados para janela de dados de 15 minutos para os métodos YW e N4SID, conforme Figuras 58 e 59 respectivamente. Pode-se concluir que ambos os métodos cumprem o objetivo inicial de estimar o modo dominante presente no sistema.

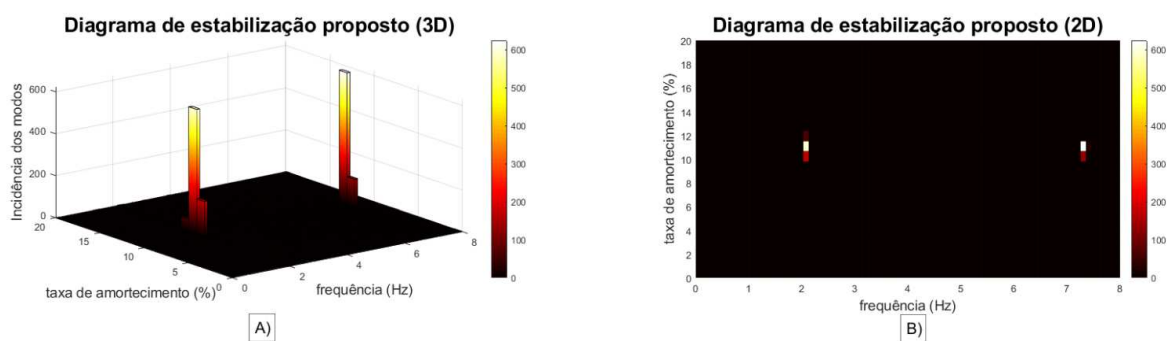


FIGURA 58 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 15 minuto de janela de dados.

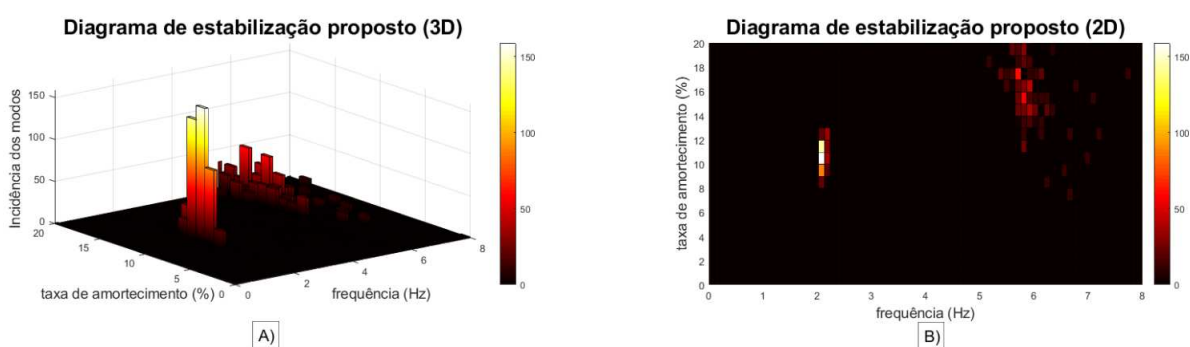


FIGURA 59 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 15 minuto de janela de dados.

Os resultados para janelas de dados de 1 minuto dos métodos YW e N4SID, desse segundo cenário, são apresentados respectivamente nas Figuras 60 e 61. Diferente do cenário 1 com janela de dados de 1 minuto, o método YW, apresentou um resultado melhor nesse segundo cenário. Tendo o método YW estimado um modo eletromecânico comparável com o modo dominante obtido via modelo conceitual.

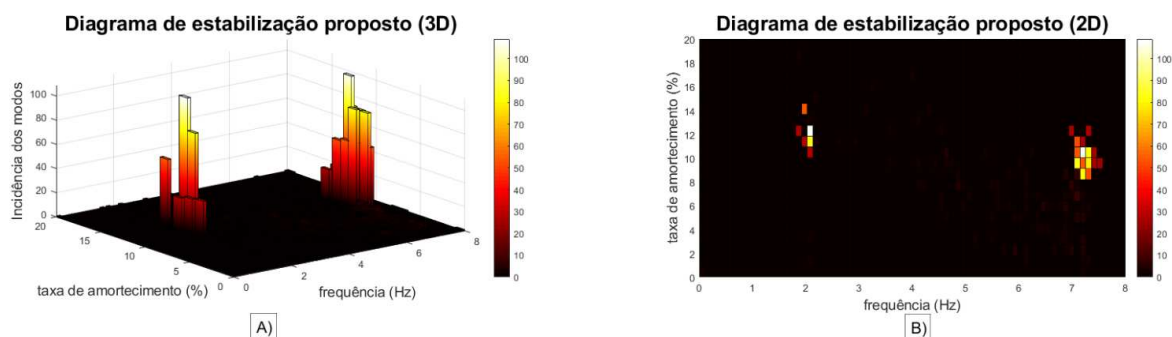
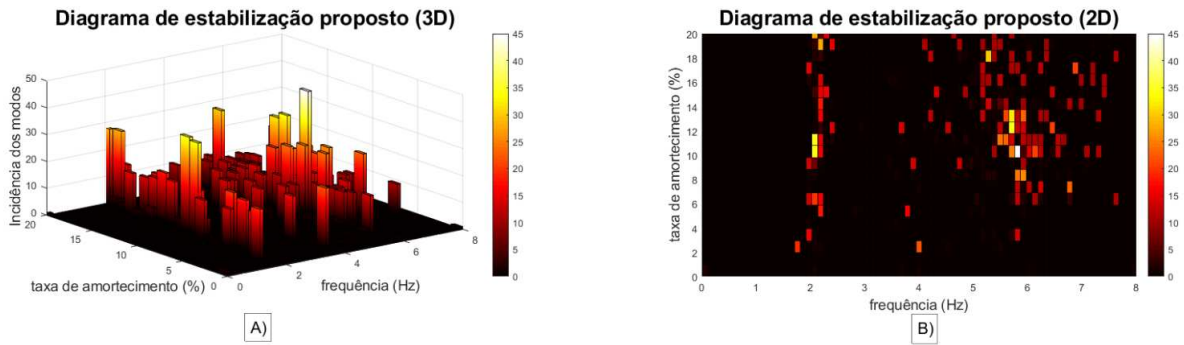
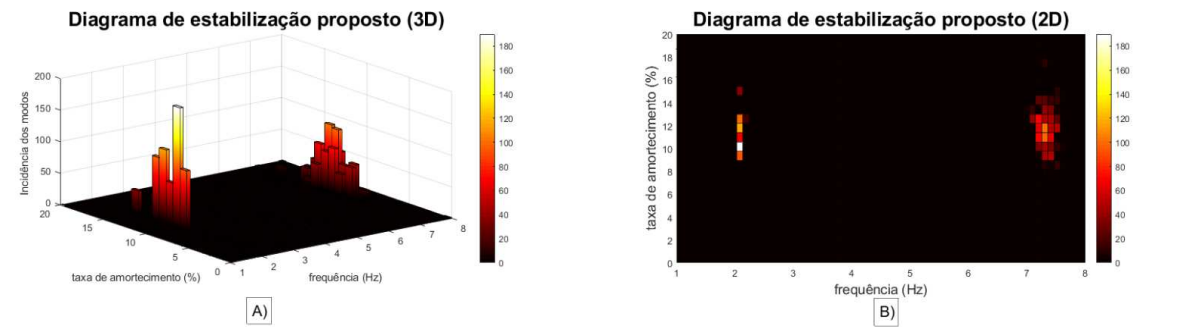
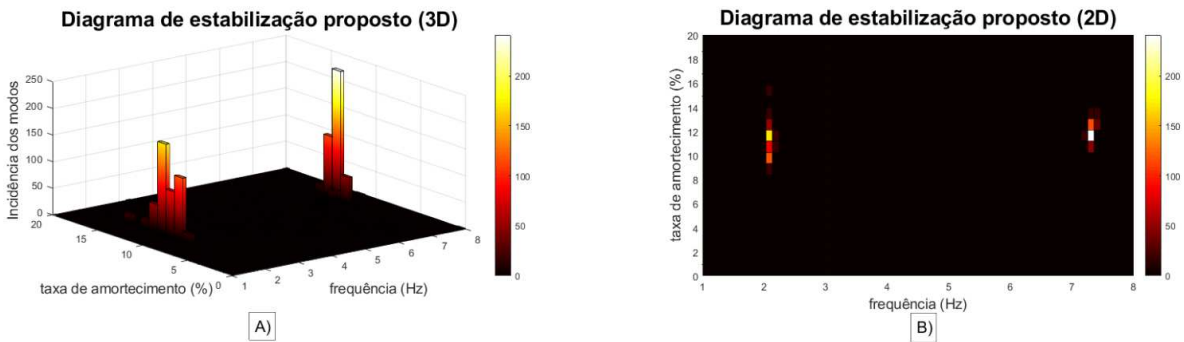


FIGURA 60 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 1 minuto de janela de dados.



Nesse segundo cenário ambos os métodos estimaram o modo dominante presente no sistema. Porém o YW teve um desempenho bem superior ao método N4SID com uma janela de 1 minuto. Mesmo assim percebe-se a influência do tamanho da janela de dados na qualidade das estimativas.

No terceiro e último cenário temos as Figuras 62 e 63, respectivamente com resultado dos métodos YW e N4SID com janelas de dados de 15 minutos. Considerando a incidência de polos, pode-se concluir que ambos os métodos comprem com o objetivo de estimar o modo dominante.



Por último, são apresentados os resultados com janelas de dados de 1 minuto para os métodos YW e N4SID, conforme Figuras 64 e 65 respectivamente. Pode-se notar um grande espalhamento de polos ao longo dos diagramas, sendo difícil identificar a presença do modo dominante

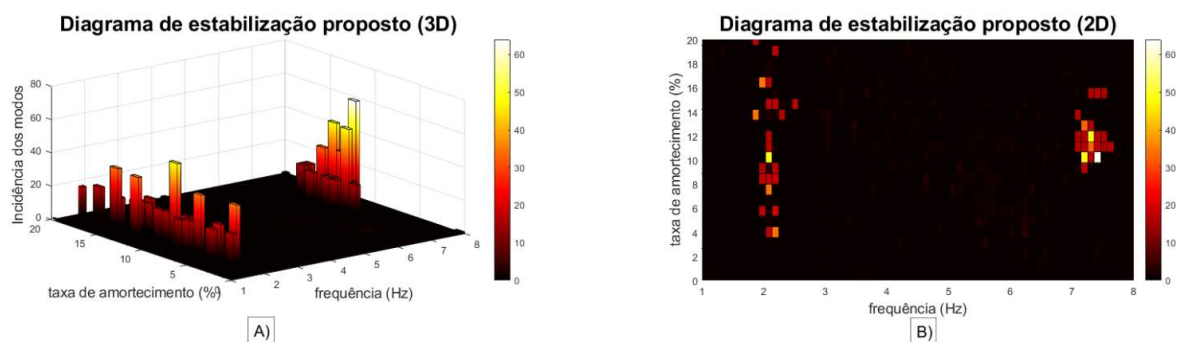


FIGURA 64 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 1 minuto de janela de dados.

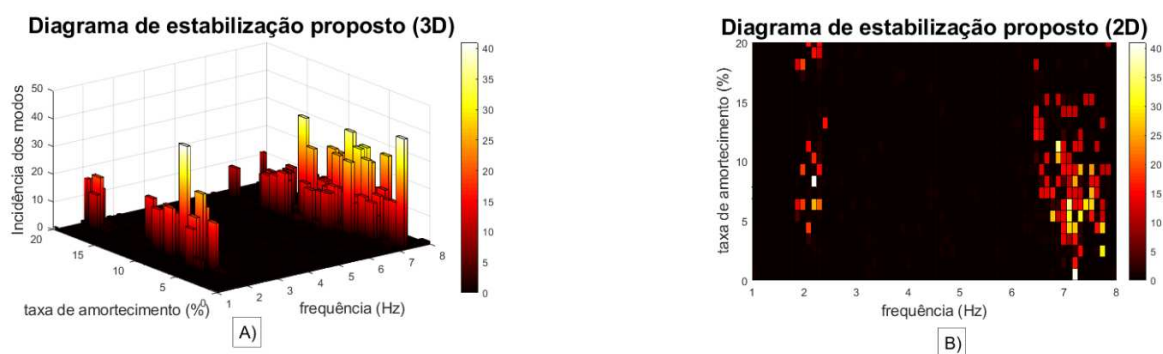


FIGURA 65 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 1 minuto de janela de dados.

Com este anexo, além de apresentar os demais resultados produzidos nesta pesquisa de mestrado, pode-se evidenciar o efeito do tamanho da janela de dados nos métodos de decomposição modal que processam dados ambientes. A comparação dos resultados com 1 e 15 minutos de dados amostrados realça a qualidade das estimativas obtidas com janelas suficientemente grandes, quando se pretende estimar os modos eletromecânicos com dados ambientes.

APÊNDICE 6 – DEMAIS RESULTADOS DO SISTEMA TESTE 2

Este anexo apresenta os resultados do sistema teste 2 não apresentados no capítulo de Testes e resultados. Começando pelos resultados do cenário 1, em seguida o cenário 2 e por último os resultados do cenário 3 para janelas de 1 e 15 minutos.

6.1 CENÁRIO 1

Para o primeiro cenário, é analisado o efeito da variação aleatória de carga na estimação dos modos eletromecânicos físicos, são utilizados 30 conjuntos de dados ambientes estimulados por variações distintas de carga. As estimativas encontradas para os 30 conjuntos de dados ambientes são sobreposta para forma os resultados apresentados a seguir.

Os resultados são apresentados para cada uma das janelas de dados, primeiramente para o método YW e em seguida para o método N4SID. Assim para janelas de dados de 20 minutos tem-se os resultados correspondentes as Figuras 66 e 67.

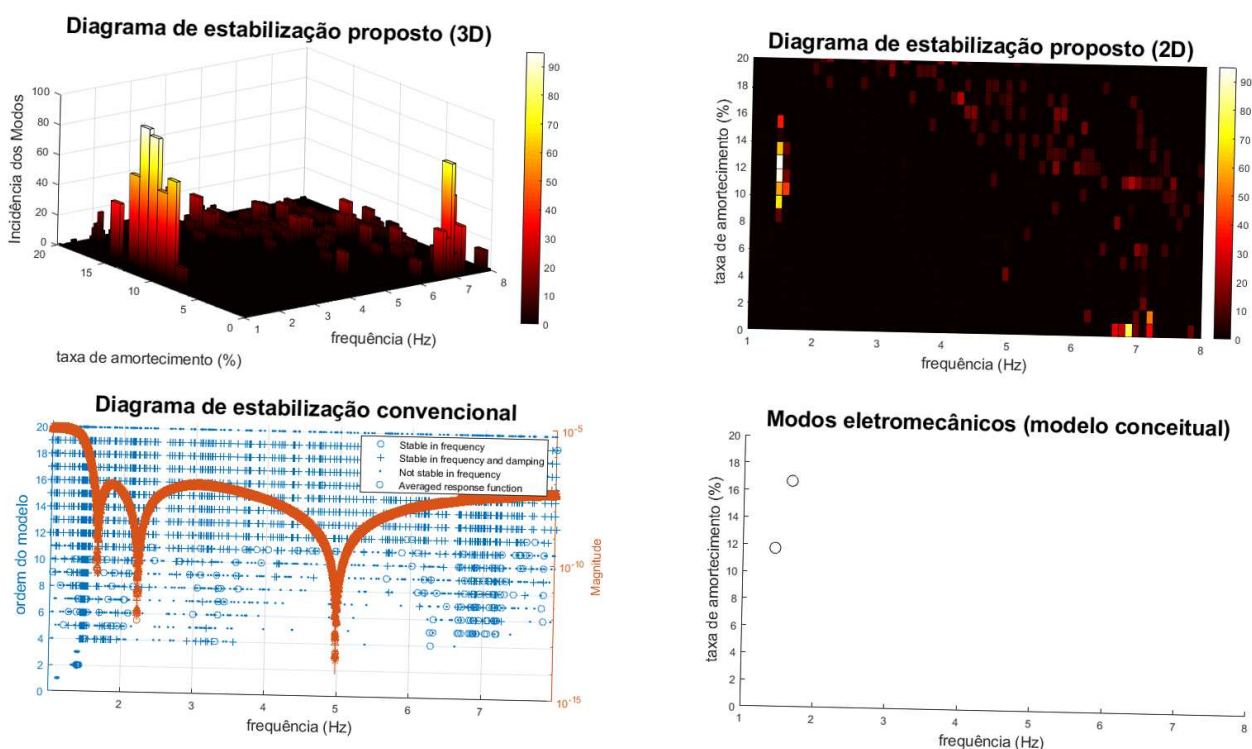


FIGURA 66 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 20 minuto de janela de dados.

Os resultados com janelas de dados de 15 minutos são apresentados nas Figuras 68 e 69.

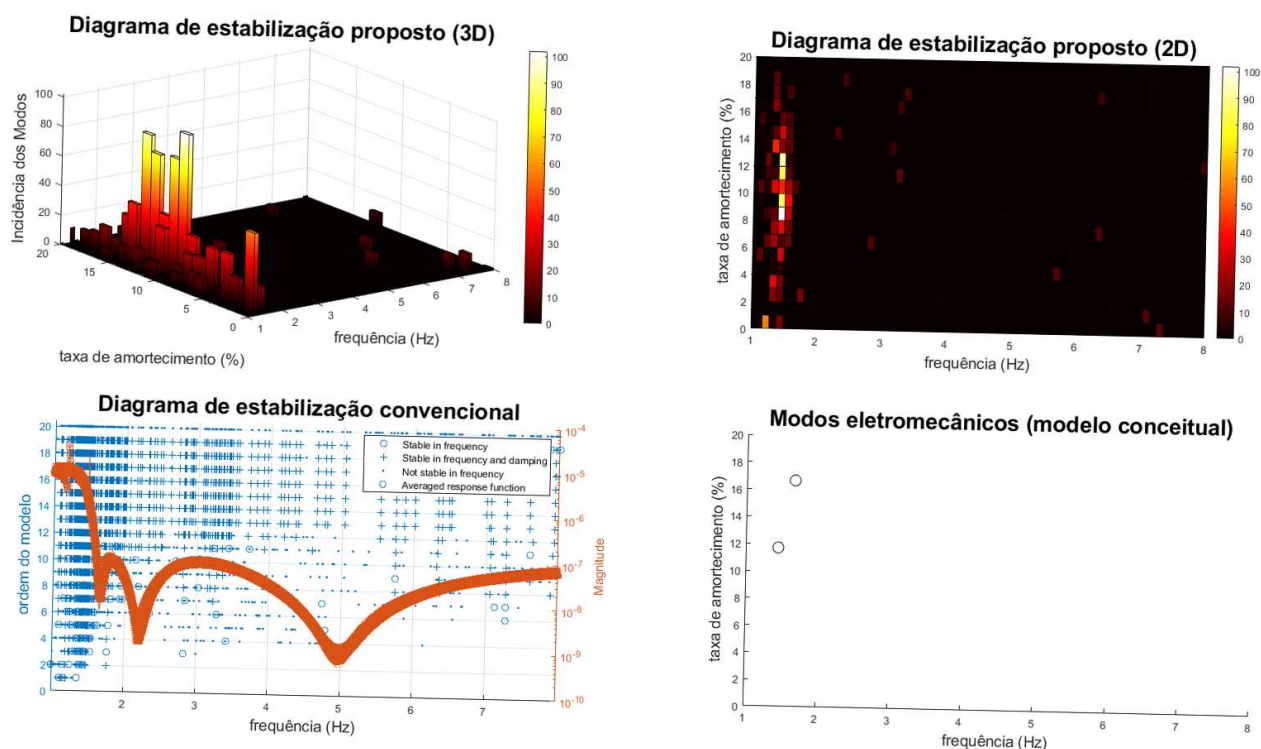


FIGURA 67 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 20 minuto de janela de dados.

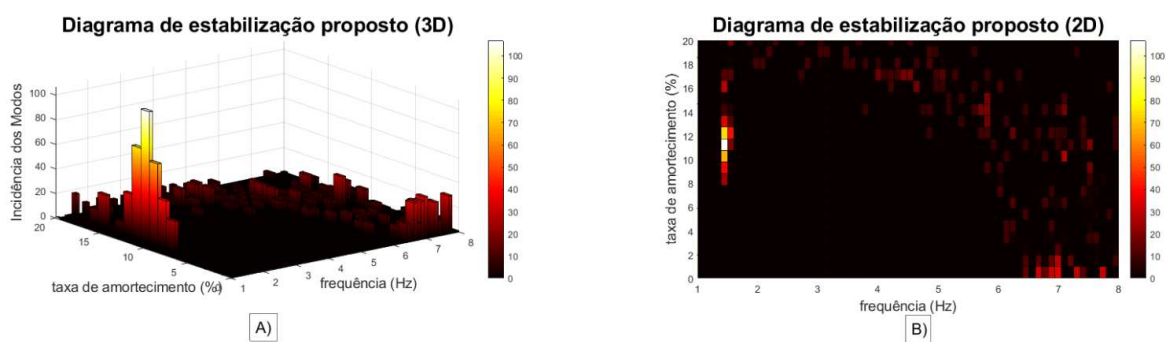


FIGURA 68 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 15 minuto de janela de dados.

Utilizando janelas de dados de 10 minutos foram encontrados os resultados das Figuras 70 e 71.

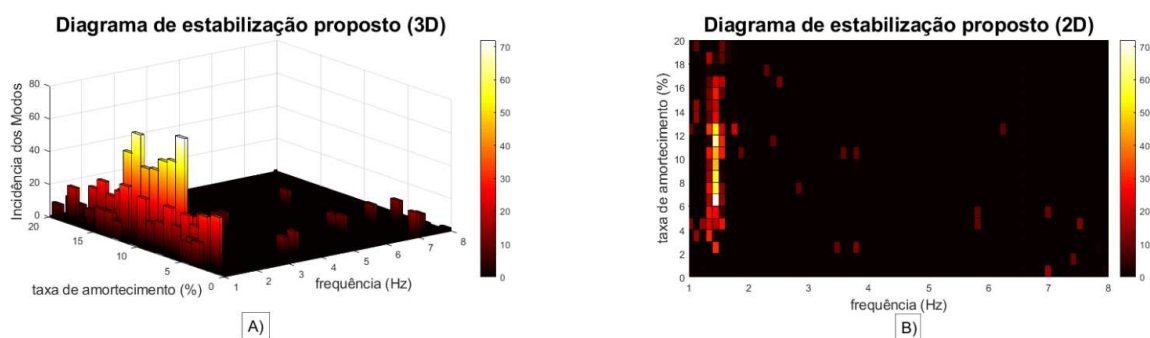


FIGURA 69 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 15 minuto de janela de dados.

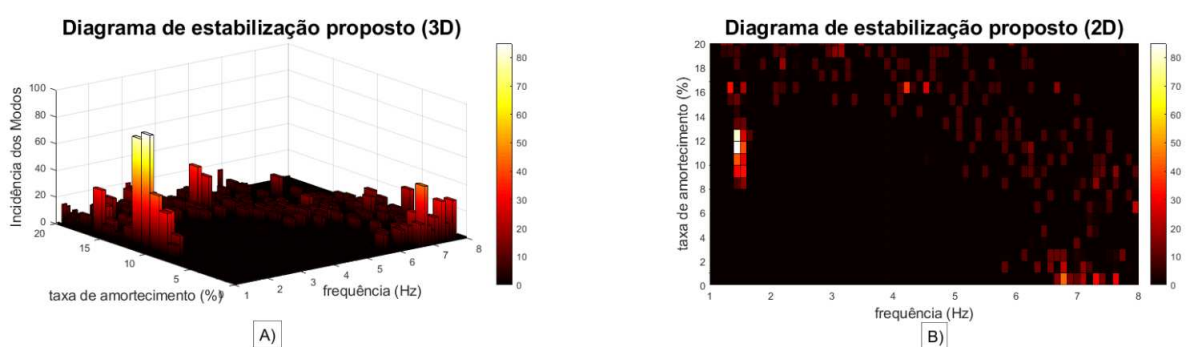


FIGURA 70 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 10 minuto de janela de dados.

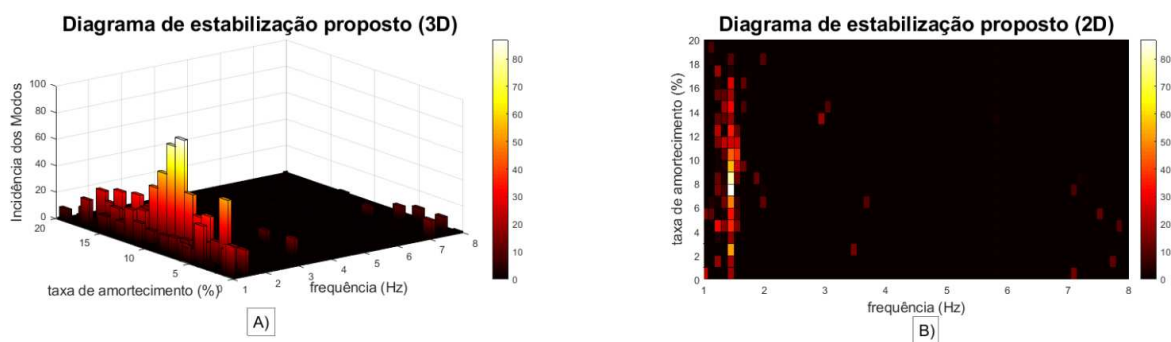


FIGURA 71 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 1 e 10 minuto de janela de dados.

Os resultados para janelas de 5 minutos são apresentados na sequência pelas Figuras 72 e 73.

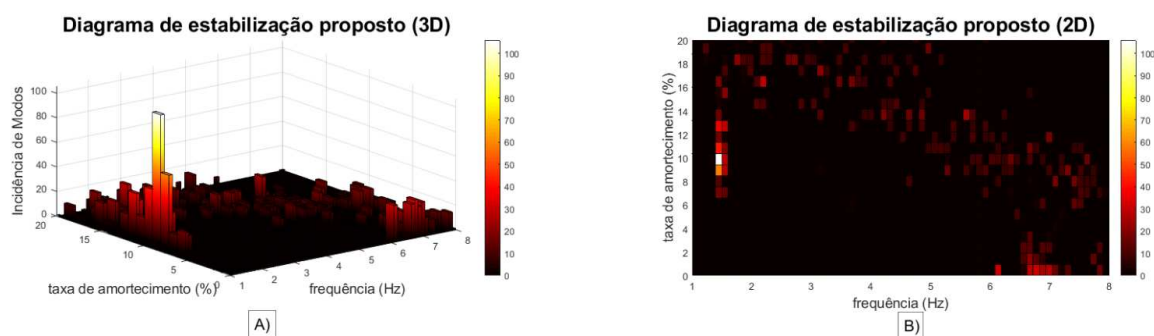


FIGURA 72 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 5 minuto de janela de dados.

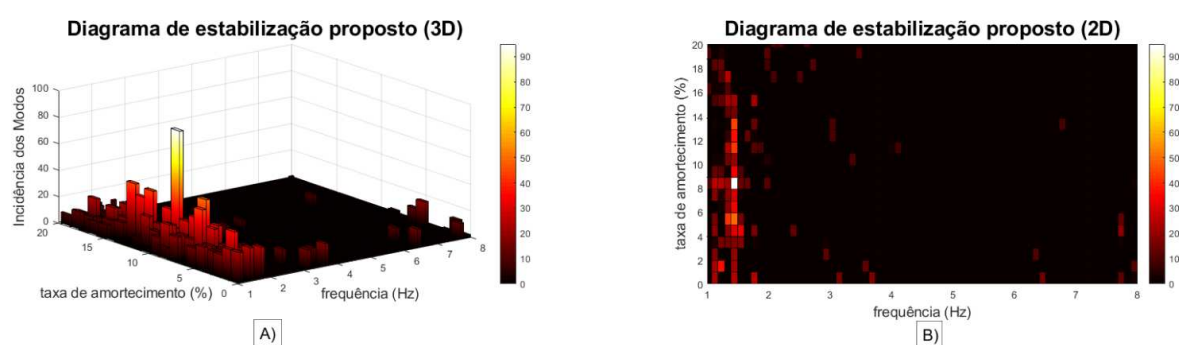


FIGURA 73 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 5 minuto de janela de dados.

Por último nesse cenário 1, são apresentados os resultados para uma janela de dados de 1 minuto, correspondentes as Figuras 75 e 74.

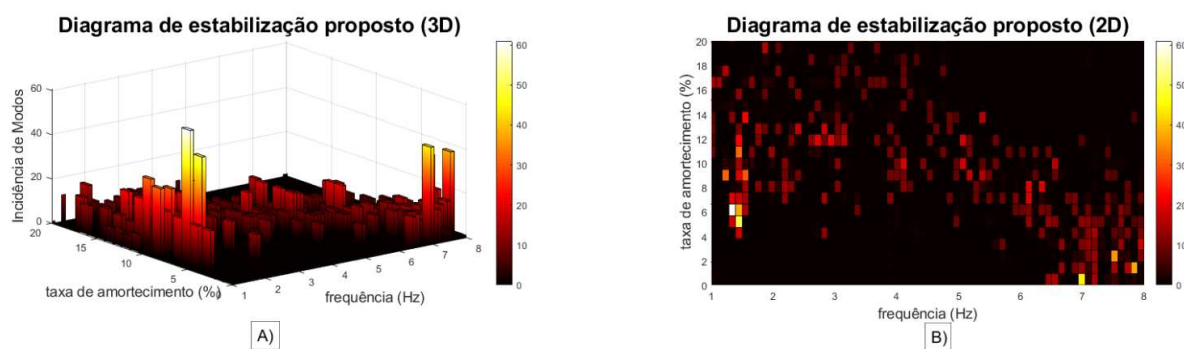
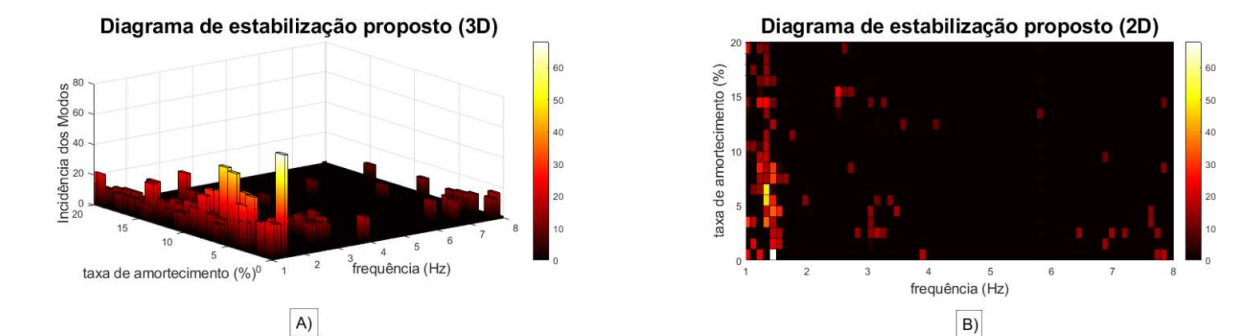


FIGURA 74 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 1 e 1 minuto de janela de dados.

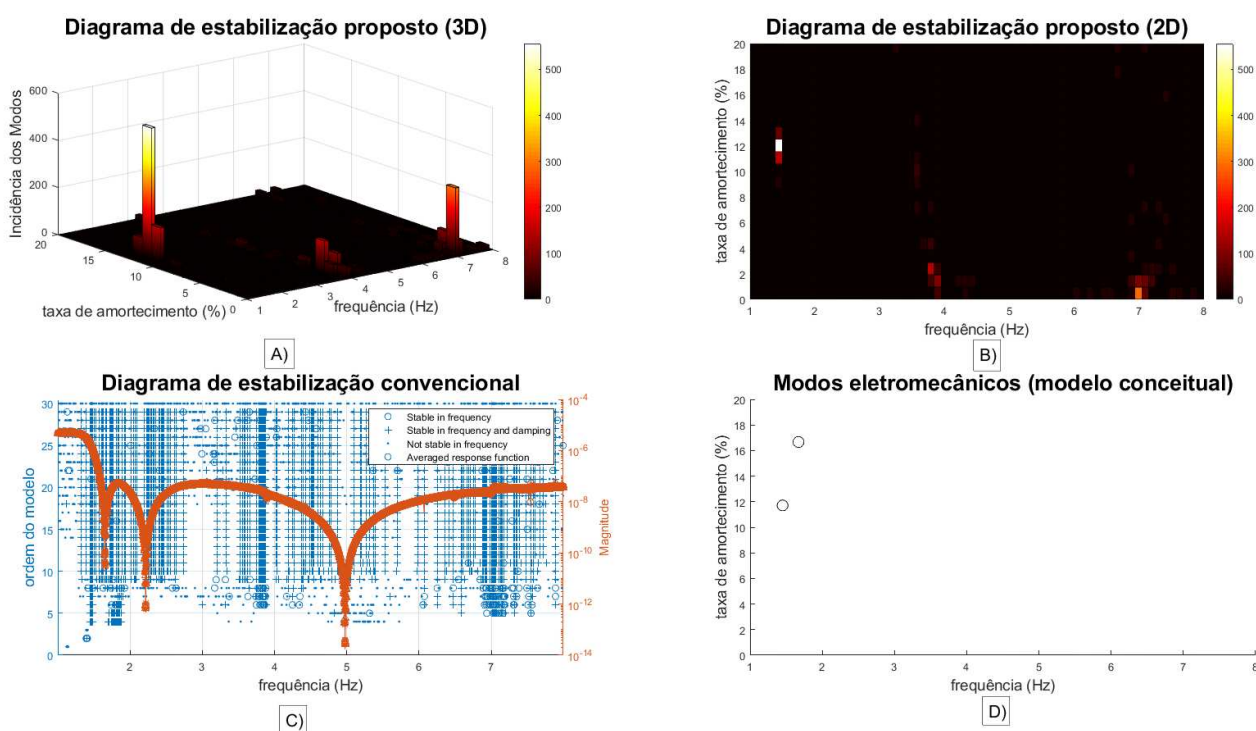
De forma geral, considerando a incidência de polos nos diagramas, é possível concluir que para janelas maiores que 5 minutos o método YW estimou um modo eletromecânico com frequência e amortecimento comparáveis ao modo global obtido via modelo conceitual. Já o método N4SID indicou a presença de um modo eletromecânico na frequência deste modo dominante, mas não estimou com precisão o amortecimento do modo estimado. Nota-se também, que a qualidade das estimativas piora com janelas de dados muito pequenas, como é o caso do processamento de janelas de 1 minuto.



6.2 CENÁRIO 2

O segundo cenário analisa o efeito do ruído de medição na estimação e classificação dos modos eletromecânicos. Para isso o diagrama de estabilização foi montado sobrepondo 30 modelos estimados pelos métodos YW e N4SID. Em cada modelo foi utilizado o mesmo conjunto de dados ambientes, porém, sendo adicionando um ruído branco diferente para cada sinal utilizado na estimação dos modelos modelos.

Da mesma forma que o cenário anterior os resultados são apresentados primeiro para o método YW e depois para o método N4SID, para cada janela de dados investigada. Começando com uma janela de dados de 20 minutos temos os resultados correspondentes nas Figuras 76 e 77.



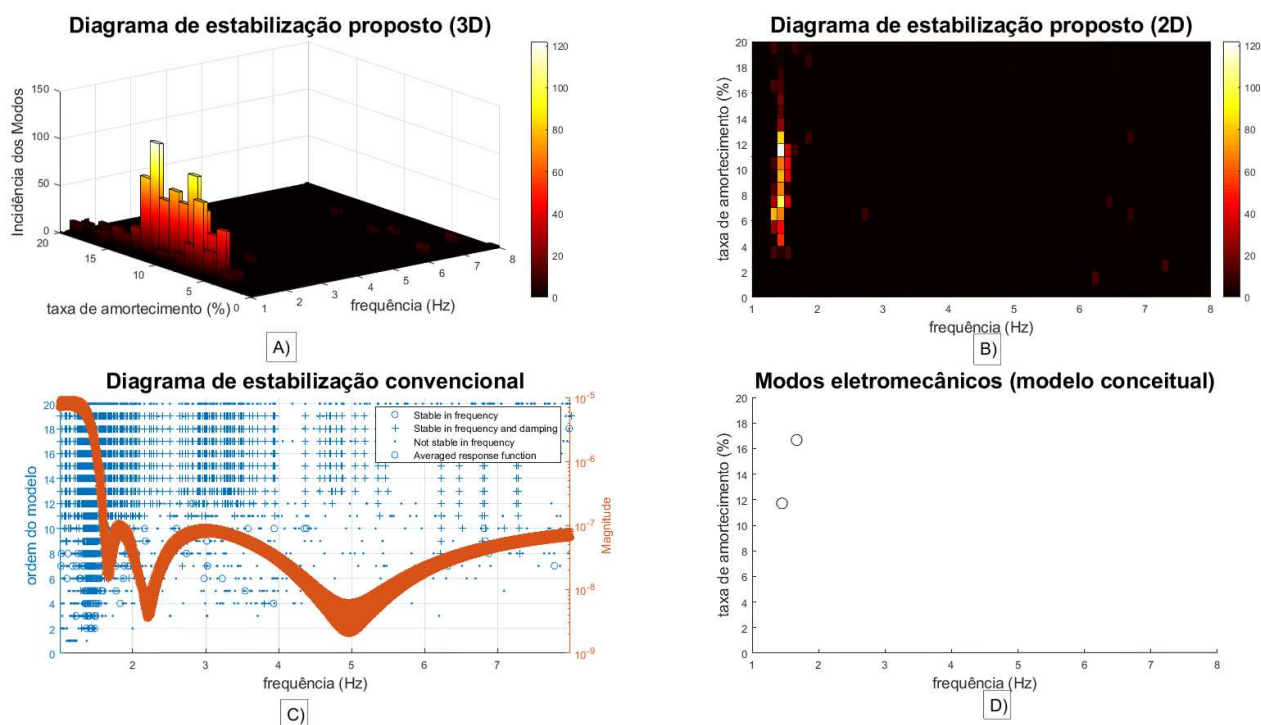


FIGURA 77 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 20 minuto de janela de dados.

Com janelas de dados de 15 minutos os resultados são apresentados nas Figuras 78 e 79.

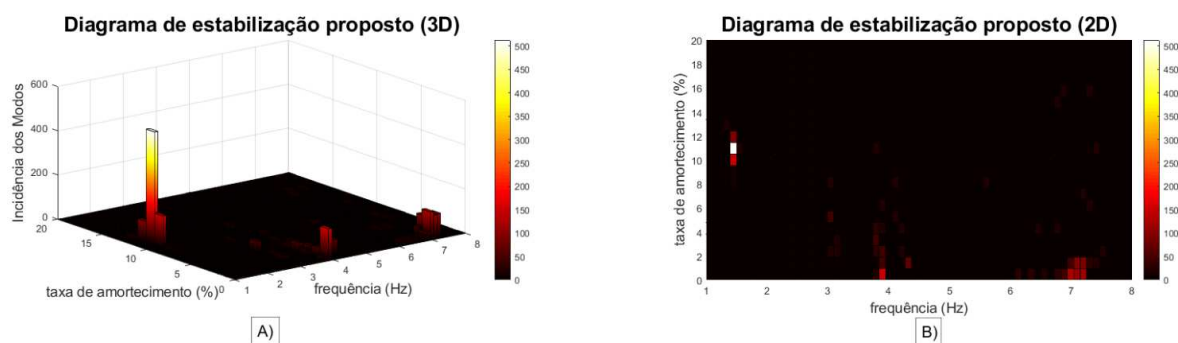


FIGURA 78 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 15 minuto de janela de dados.

Já os resultados para janelas de dados de 10 minutos são apresentados nas Figuras 80 e 81.

Dando sequência, os resultados para janelas de dados de 5 minutos são apresentados nas Figuras 82 e 83.

Por último nesse cenário tem-se os resultados para uma janela de dados de 1 minuto apresentados nas Figuras 84 e 85.

Pode-se notar que, para o segundo sistema teste, a presença de ruído de medição nos

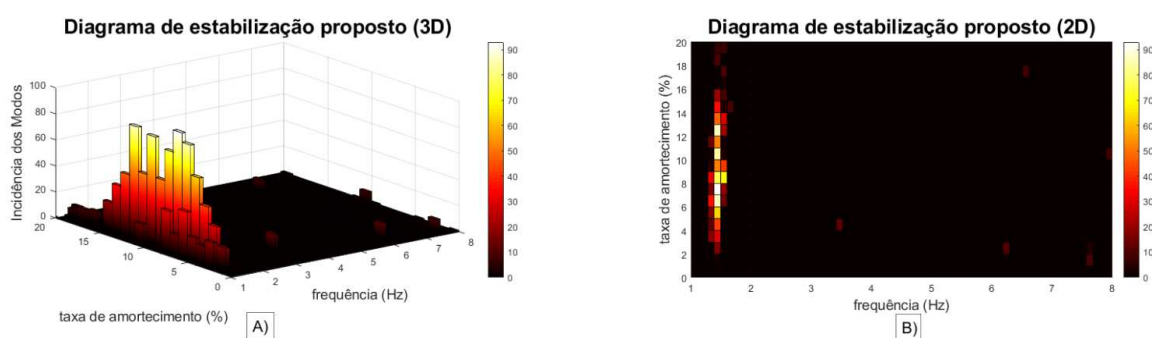


FIGURA 79 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 15 minuto de janela de dados.

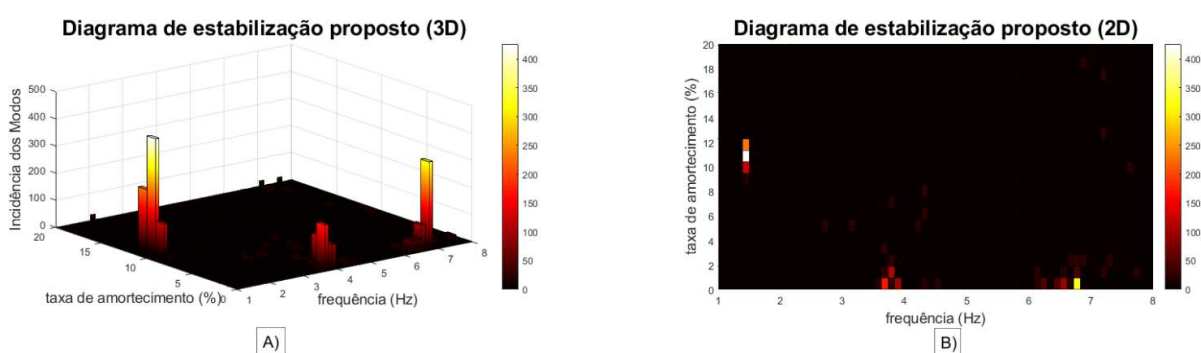


FIGURA 80 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 10 minuto de janela de dados.

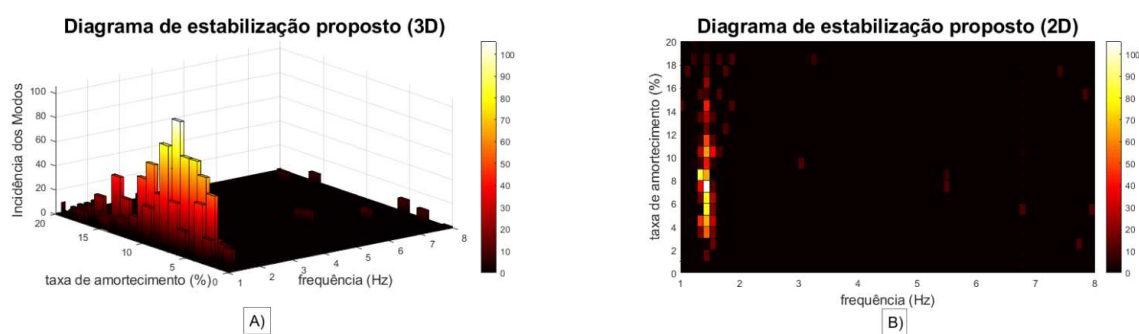


FIGURA 81 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 10 minuto de janela de dados.

sinais amostrados proposta pelo cenário 2, dificultou a estimação dos modos eletromecânicos para ambos os métodos, mas principalmente para o método YW

6.3 CENÁRIO 3

Com o terceiro cenário é investigado o efeito da variação aleatória de carga e do ruído de medição no processo de estimação modal. Neste anexo são apresentados os resultados de 15 e um minuto. A parte principal dos resultados estão apresentadas no corpo principal do texto, no capítulo de testes e resultados.

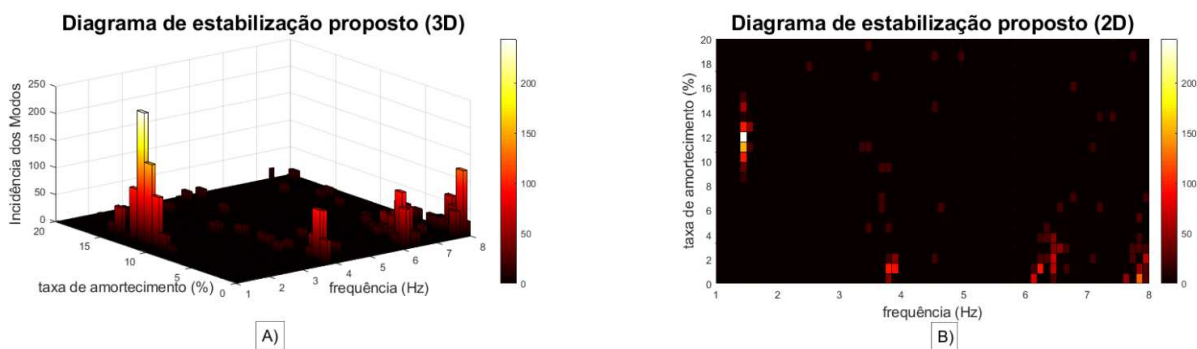


FIGURA 82 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 5 minuto de janela de dados.

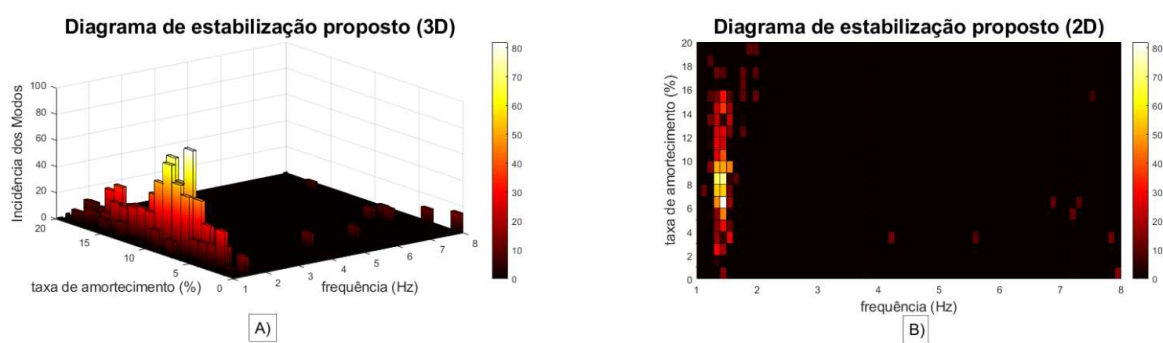


FIGURA 83 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 5 minuto de janela de dados.

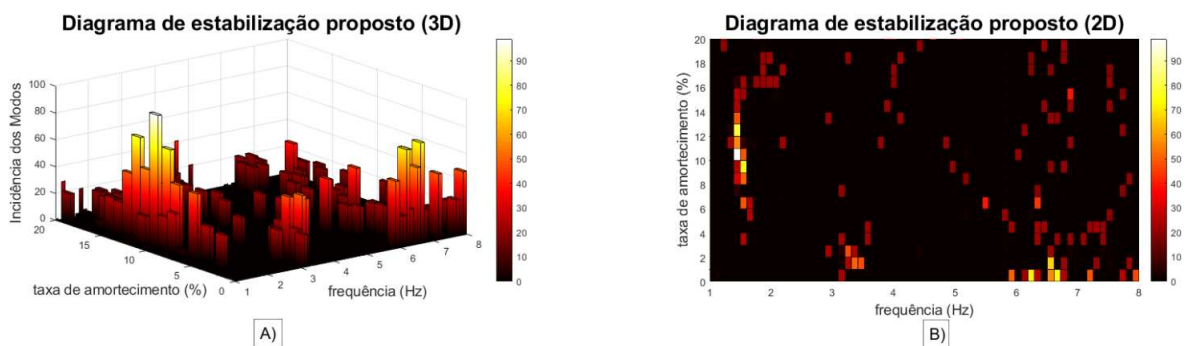


FIGURA 84 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 2 e 1 minuto de janela de dados.

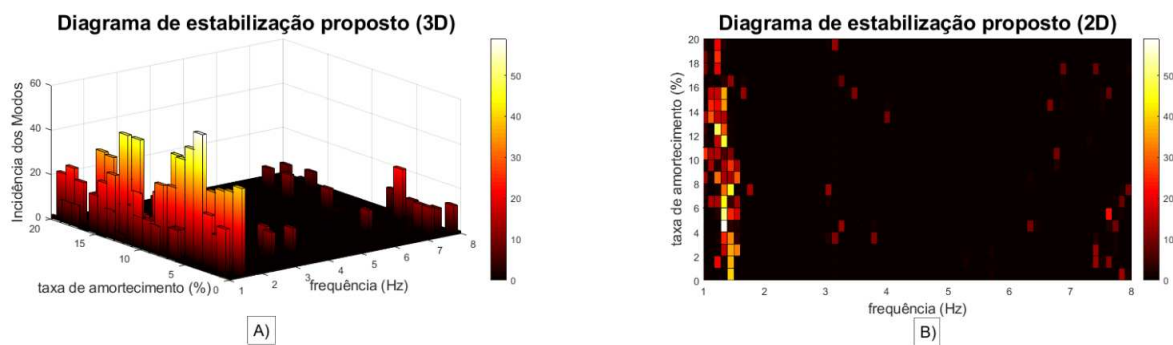


FIGURA 85 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 2 e 1 minuto de janela de dados.

O primeiro resultado apresentado são as Figuras 86 e 87, que correspondem a janelas de dados de 15 minutos.

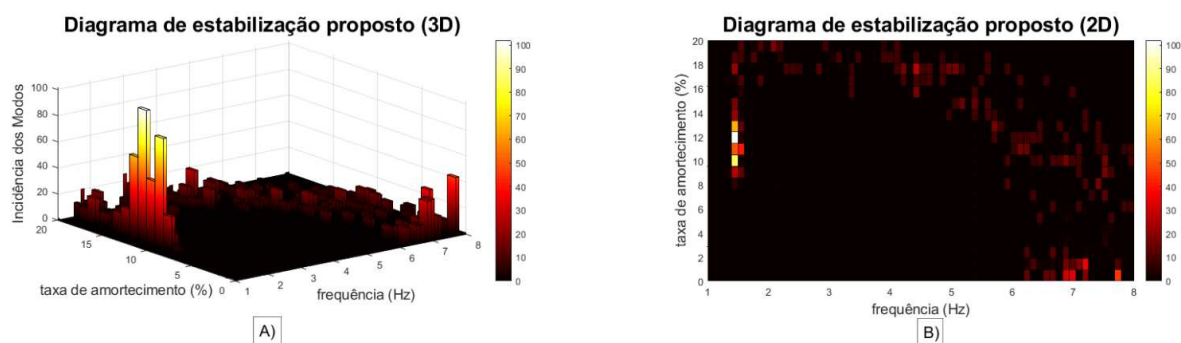


FIGURA 86 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 15 minuto de janela de dados.

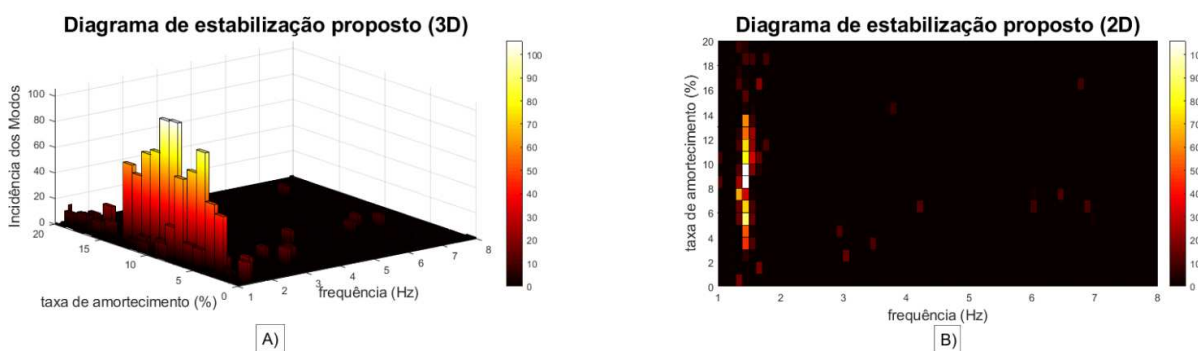


FIGURA 87 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 15 minuto de janela de dados.

Para janelas de dados de 1 minuto tem-se os resultados apresentados nas Figuras 88 e 89.

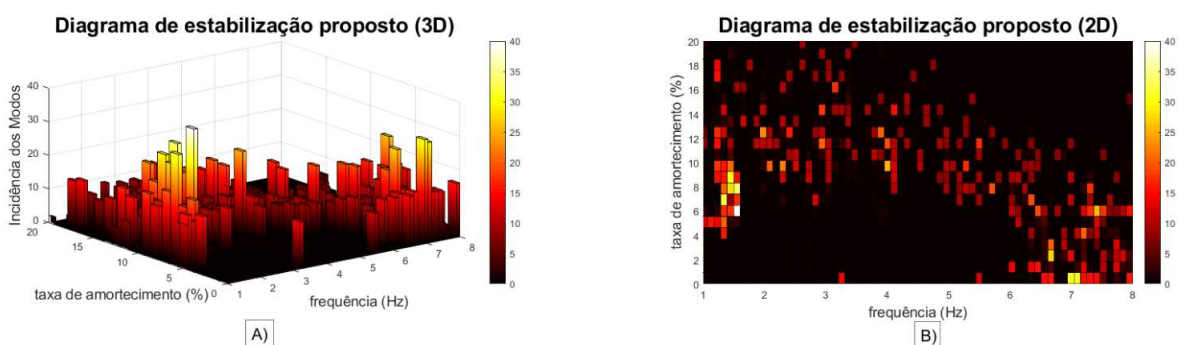


FIGURA 88 – Método YW, ordem do modelo=20, cenário 3 e 1 minuto de janela de dados.

Para os resultados encontrados para janelas de dados de 15 minutos, pode-se concluir pela incidência de polos que ambos os métodos estimaram a presença de um modo eletromecânico de frequência comparável ao modo dominante obtido via modelo conceitual. Pode-se

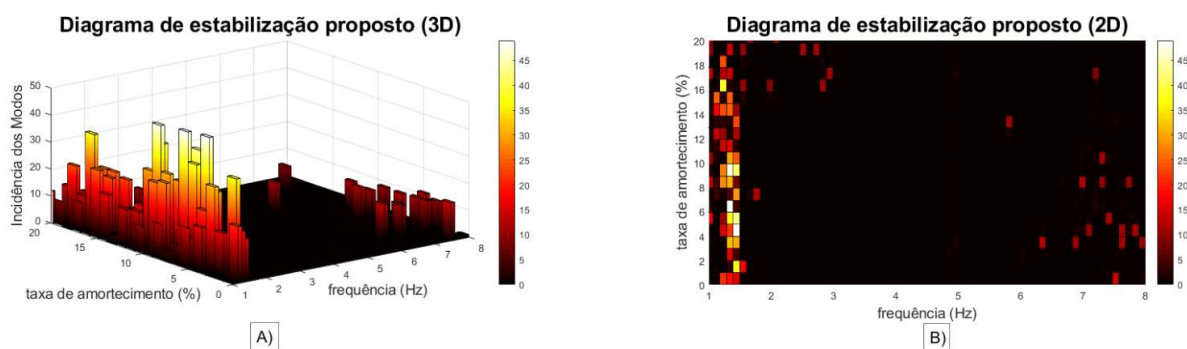


FIGURA 89 – Método N4SID, ordem do modelo=20, cenário 3 e 1 minuto de janela de dados.

destacar o método YW por apresentar uma estimativa do amortecimento desse modo estimado mais próxima ao modo dominante.

Fica-se evidente mais uma vez, comparando os resultados com janelas de dados de tamanhos bem diferentes, que janelas muito pequenas de dados não contém informação suficiente para que os métodos de decomposição modal calculem boas estimativas em sinais ambientes.