

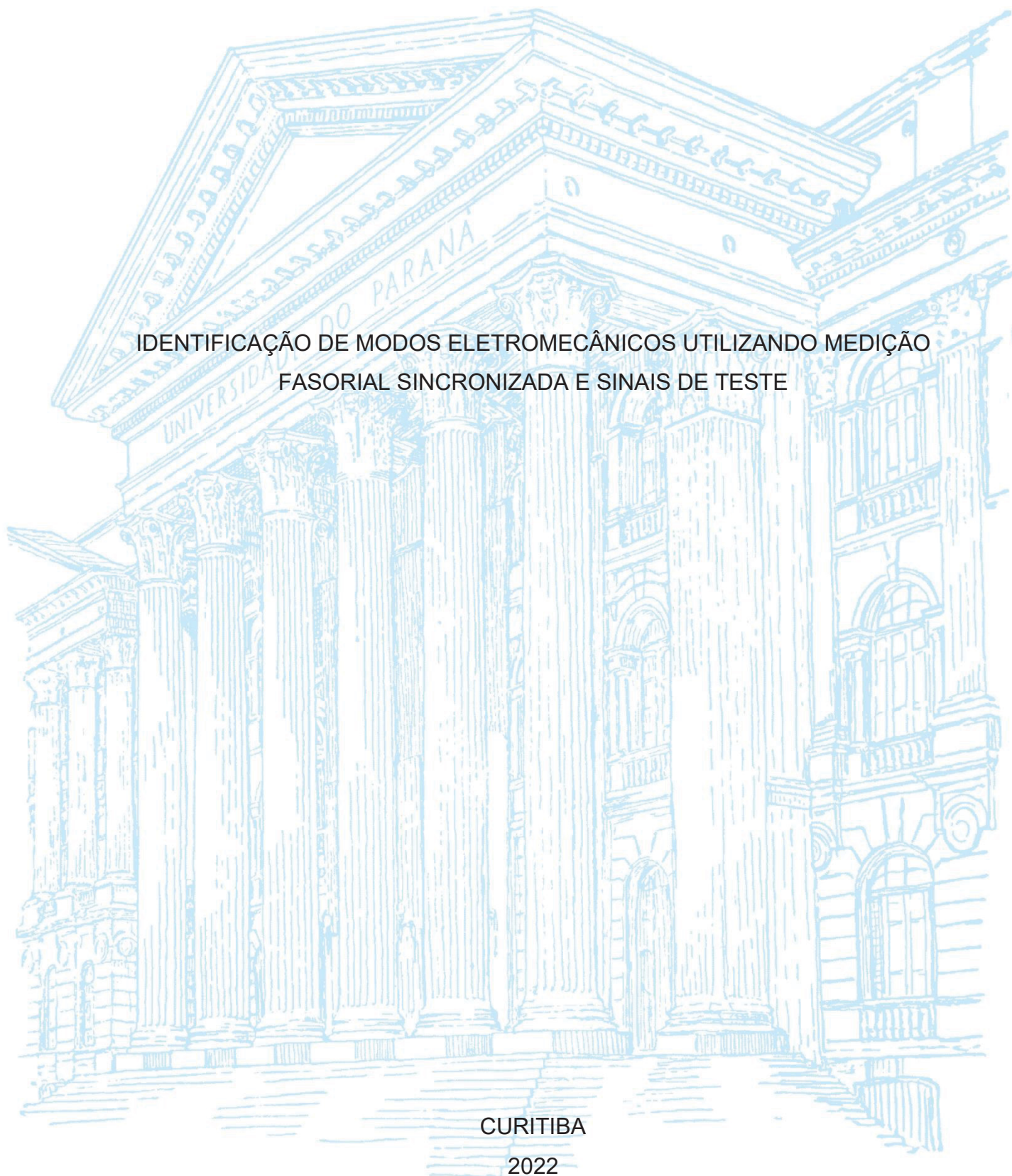
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DEBORAH LOUISE MACHADO GAERTNER

IDENTIFICAÇÃO DE MODOS ELETROMECCÂNICOS UTILIZANDO MEDIÇÃO  
FASORIAL SINCRONIZADA E SINAIS DE TESTE

CURITIBA

2022



DEBORAH LOUISE MACHADO GAERTNER

IDENTIFICAÇÃO DE MODOS ELETROMECAÑICOS UTILIZANDO MEDIÇÃO  
FASORIAL SINCRONIZADA E SINAIS DE TESTE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de concentração em Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Schumacher

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Gaertner, Deborah Louise Machado.

Identificação de modos eletromecânicos utilizando medição fasorial sincronizada e sinais de teste / Deborah Louise Machado Gaertner. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Schumacher.

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira.

1. Engenharia Elétrica. 2. Sistemas elétricos - planejamento. 3. Sistemas de energia elétrica. 4. Identificação de sistemas. I. Schumacher, Ricardo. II. Oliveira, Gustavo Henrique da Costa. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Bibliotecário: Nilson Carlos Vieira Junior CRB-9/1797



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **DEBORAH LOUISE MACHADO GAERTNER** intitulada: **Identificação de modos eletromecânicos utilizando medição fasorial sincronizada e sinais de teste**, sob orientação do Prof. Dr. RICARDO SCHUMACHER, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra 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, 05 de Agosto de 2022.

Assinatura Eletrônica  
08/08/2022 12:50:22.0  
RICARDO SCHUMACHER  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
08/08/2022 23:16:30.0  
ALEXANDRE RASI AOKI  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
08/08/2022 11:17:08.0  
ODILON LUIS TORTELLI  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
09/08/2022 12:10:50.0  
RAPHAEL AUGUSTO DE SOUZA BENEDITO  
Avaliador Externo (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS  
DE ENERGIA)

*Aos meus pais, Maria Elena e Ion, por todo amor, carinho, incentivo, apoio e compreensão.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus pela dádiva da vida e por me abençoar com tantos presentes divinos. Obrigada por ser minha força e me permitir superar obstáculos e me dar forças para concluir esta dissertação.

Agradeço aos meus pais, Maria Elena e Ion, por desde cedo me incentivarem a estudar, me aperfeiçoar e ter disciplina. Sem todo o amor, carinho e dedicação deles eu nunca teria chegado até aqui. Obrigada por serem meu maior exemplo, amo muito vocês.

Minha gratidão especial ao Prof. Dr. Ricardo Schumacher, meu orientador, por todos os ensinamentos, conhecimentos compartilhados, dedicação, conversas, apoio e paciência ao longo desses anos de mestrado. Agradeço também ao Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira, meu coorientador, por dedicar seu tempo e contribuir significativamente para o desenvolvimento desta dissertação. Obrigada por estarem ao meu lado e acreditarem no meu potencial.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Odilon Luís Tortelli, Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki e Prof. Dr. Raphael Augusto de Souza Benedito que tão gentilmente aceitaram participar, compartilhando conhecimentos e colaborando com esta dissertação.

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram, me ajudaram, apoiaram e estiveram presentes durante esta longa jornada.

## RESUMO

As PMUs (*Phasor Measurement Unit*) são equipamentos de medição cada vez mais indispensáveis em sistemas elétricos de potência (SEPs), pois permitem o monitoramento em tempo real de tais sistemas com uma alta taxa de amostragem. A partir de dados extraídos por esses dispositivos, também é possível estimar os modos eletromecânicos dominantes do sistema sob análise, permitindo inferir acerca de sua estabilidade angular, estando esta associada à operação dos geradores síncronos do sistema. Nesse contexto, estimativas para os modos eletromecânicos são geralmente geradas usando-se técnicas de identificação de sistemas que se baseiam apenas no processamento de sinais de saída. Tais sinais de saída são os próprios sinais adquiridos pelas PMUs em diferentes barras do sistema, e correspondem, tipicamente, a sinais de frequência de operação e/ou de tensão (módulo ou defasagens angulares). Entretanto, o uso apenas de sinais de saída pode resultar em estimativas imprecisas para os modos eletromecânicos em diversos casos (especialmente no que diz respeito às suas taxas de amortecimento). Como alternativa, algumas técnicas consideram adicionalmente sinais de entrada, também chamados nesse contexto de sinais de teste, ou, em inglês, *probing*. Esta dissertação tem por objetivo considerar o uso de sinais de teste em técnicas de identificação de sistemas a fim de melhorar a precisão obtida para os modos eletromecânicos estimados. Nesse sentido, é proposta uma adaptação do método *Vector Fitting* (VF) que, até o presente momento, foi majoritariamente utilizado para o contexto de estimação de modos oscilatórios a partir de dados transitórios. Nesta dissertação, considera-se como sinais de teste as variações naturais de potência ativa apresentadas pelas cargas conectadas às barras do sistema ao longo do tempo. Para comparar e validar os resultados obtidos, também foi utilizado o tradicional método N4SID (do inglês, *Numerical Algorithm for SubSpace State Space System Identification*). Os métodos VF e N4SID foram aplicados em dois sistemas teste, um com 11 barras e outro com 39 barras. Os resultados obtidos mostram o potencial da utilização de sinais de teste na estimação de modos eletromecânicos em SEPs. Especificamente, para diversos casos observa-se que o uso do método VF e N4SID com sinais de teste é capaz de gerar estimativas mais precisas para os modos eletromecânicos em comparação com simulações feitas sem a consideração de tais sinais.

Palavras-chave: monitoramento de sistemas de energia; identificação de sistemas; wide area measurement system (WAMS); vector fitting (VF); numerical algorithm for subspace state space system identification (N4SID).

## ABSTRACT

PMUs (Phasor Measurement Unit) are increasingly indispensable measurement equipment in electrical power systems (SEPs), as they allow real-time monitoring of such systems with a high sampling rate. From data extracted by these devices, it is also possible to estimate the dominant electromechanical modes of the system under analysis, allowing inferences about its angular stability, which is associated with the operation of the system's synchronous generators. In this context, estimates for electromechanical modes are generally generated using system identification techniques that rely only on output signal processing. Such output signals are the signals acquired by the PMUs on different buses of the system, and typically correspond to operating frequency and/or voltage signals (module or angular lags). However, using only output signals can result in inaccurate estimates for electromechanical modes in many cases (especially about their damping ratios). Alternatively, some techniques additionally consider input signals, also called, in this context, test signals or probing. This dissertation aims to consider the use of test signals in system identification techniques to improve the accuracy obtained for the estimated electromechanical modes. In this sense, an adaptation of the Vector Fitting (VF) method is proposed, which, until now, has been mostly used in the context of estimating oscillatory modes from transient data. In this dissertation, the natural variations of active power presented by the loads connected to the system buses over time are considered as test signals. To compare and validate the results obtained, the traditional N4SID method (Numerical Algorithm for SubSpace State Space System Identification) was also used. The VF and N4SID methods were applied in two test systems, one with 11 buses and the other with 39 buses. The results obtained show the potential of using test signals in the estimation of electromechanical modes of SEPs. Specifically, for several cases it is observed that the use of the VF and N4SID method with test signals can generate more accurate estimates for the electromechanical modes compared to simulations made without considering such signals.

**Keywords:** power system monitoring; system identification; wide area measurement system (WAMS); vector fitting (VF); numerical algorithm for subspace state space system identification (N4SID).



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Distribuição de artigos referente a PMUs ao longo dos anos .....	16
FIGURA 2 – Classificação das técnicas de estimação modal dos sistemas de energia. ....	18
FIGURA 3 – Operação de sistemas de energia em condições ambiente e de transitório. ....	19
FIGURA 4 – Fluxograma do processo de estimação modal .....	23
FIGURA 5 – Etapas de pré-processamento .....	24
FIGURA 6 – Exemplo de <i>outlier</i> em um sinal de frequência .....	25
FIGURA 7 – Espectro de frequências com predominância de modos de baixas frequências.....	27
FIGURA 8 – Resposta em frequência filtros <i>Butterworth</i> para $N = 3$ e $N = 4$ .....	28
FIGURA 9 – Modelo para dinâmica de sistema de potência.....	30
FIGURA 10 – Algoritmo N4SID .....	50
FIGURA 11 – Sistema de 11 barras com 4 turbinas térmicas .....	51
FIGURA 12 – Fluxograma do Algoritmo de Estimação de Modos Oscilatórios .....	53
FIGURA 13 – Entrada medida e Saídas Medidas e Estimadas – Cenário 1 .....	55
FIGURA 14 – Entrada medida e Saídas Medidas e Estimadas – Cenário 2.....	57
FIGURA 15 – Polos eletromecânicos obtidos nas simulações do Método N4SID – sistema mais carregado .....	58
FIGURA 16 – Entrada medida e Saídas Medidas e Estimadas – Cenário 3.....	61
FIGURA 17 – Entrada medida e Saídas Medidas e Estimadas – Cenário 4 .....	62
FIGURA 18 – Polos eletromecânicos obtidos nas simulações do Método N4SID – sistema menos carregado .....	63
FIGURA 19 – Sistema <i>New England</i> de 39 barras.....	66
FIGURA 20 – Polos eletromecânicos estimados através dos métodos N4SID e VF – Cenário 1 .....	70
FIGURA 21 – Entrada medida (Potência Ativa - barra 20) e Saída Medida e Estimada (Frequência – barra 31).....	71
FIGURA 22 – Polos eletromecânicos estimados através dos métodos N4SID e VF – Cenário 2 .....	72
FIGURA 23 – Entrada medida (Potência Ativa - barra 39) e Saída Medida e Estimada (Frequência – barra 39).....	73

FIGURA 24 – Polos eletromecânicos estimados através do método N4SID – Cenário 3 .....	74
FIGURA 25 – Polos eletromecânicos estimados através do método N4SID – Cenário 4 .....	75
FIGURA 26 – Polos eletromecânicos estimados através do método N4SID – Cenário 5 .....	77
FIGURA 27 – Polos eletromecânicos estimados através do método N4SID – Cenário 6 .....	78

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Cenários simulados no Matlab utilizando o sistema Kundur de 11 barras .....	54
TABELA 2 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento para o sistema mais carregado .....	59
TABELA 3 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento para o sistema menos carregado .....	64
TABELA 4 – Cenários simulados para o sistema de 39 barras.....	68
TABELA 5 – Carregamento das barras do sistema de 39 barras.....	69
TABELA 6 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento das simulações do Cenário 1 .....	70
TABELA 7 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento das simulações do Cenário 2 .....	72
TABELA 8 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento das simulações do Cenário 3 .....	74
TABELA 9 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento das simulações do Cenário 4 .....	76
TABELA 10 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento das simulações do Cenário 5 .....	77
TABELA 11 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento das simulações do Cenário 6 .....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

CEPEL	- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGRÈ	- Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos
COPEL	- Companhia Paranaense de Energia.
DC	- <i>Direct Current.</i>
DFT	- <i>Discrete Fourier Transform</i>
FD-VF	- <i>Frequency Domain Vector Fitting</i>
FFT	- <i>Fast Fourier Transform.</i>
GPS	- <i>Global Position Systems.</i>
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
IV-RTD-VF	- <i>Instrumental Variable Real-Time Domain Vector Fitting Method.</i>
MIMO	- <i>Multiple Input Multiple Output.</i>
MSE	- <i>Mean Squared Error</i>
N4SID	- <i>Numerical Algorithm for SubSpace State Space System Identification</i>
OE	- <i>Output Error</i>
ONS	- Operador Nacional do Sistema
PIB	- Produto Interno Bruto
PMU	- <i>Phasor Measurement Unit.</i>
RASSI	- <i>Recursive Adaptive Stochastic Subspace Identification.</i>
RBF	- <i>Rational Basis Functions</i>
RML	- <i>Recursive Maximum Likelihood estimator.</i>
RRLS	- <i>Robust Recursive Least Square.</i>
RTD-VF	- <i>Real-Time Domain Vector Fitting Method.</i>
RTVF	- <i>Real-Time Vector Fitting.</i>
R3LS	- <i>Robust Recursive Regularized Least Squares.</i>
SCADA	- Sistema Supervisor de Controle de Dados.
SEP	- Sistema Elétrico de Potência.
SIN	- Sistema Interligado Nacional.
SIM	- Método de Identificação por Subespaço
SISO	- <i>Single Input Single Output.</i>
SMSF	- Sistema de Medição Sincronizada de Fasores.
SNR	- <i>Signal-to-Noise Ratio.</i>
SVD	- <i>Singular Value Decomposition.</i>

- TD-VF - *Time Domain Vector Fitting*
- VF - *Vector Fitting.*
- WAMS - *Wide Area Monitoring Systems.*
- YW - *Yule Walker.*
- YW-MAR - *Yule Walker-Multivariate Autoregressive Model.*
- YWS - *Yule Walker-Spectrum.*
- 2SLS - *Two-Stage Least Squares Algorithm*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 UTILIZAÇÃO DE WAMS E PMUS PARA ESTIMAÇÃO DE MODOS ELETROMECÂNICOS .....	16
1.2 JUSTIFICATIVA .....	20
1.3 OBJETIVOS .....	21
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	22
<b>2 ESTIMAÇÃO DE MODOS ELETROMECÂNICOS EM SEPS</b> .....	<b>23</b>
2.1 ETAPAS DA ESTIMAÇÃO DE MODOS ELETROMECÂNICOS EM SEP .....	23
2.2 ETAPA DE PRÉ-PROCESSAMENTO DO SINAL AMBIENTE .....	24
2.2.1 Tratamento de <i>outliers</i> .....	24
2.2.2 Remoção da média .....	26
2.2.3 Filtragem .....	26
2.2.4 Dizimação ( <i>downsampling</i> ) .....	28
2.3 ETAPA DE PROCESSAMENTO DO SINAL AMBIENTE .....	29
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>32</b>
3.1 MÉTODOS QUE SE BASEIAM EM DADOS TRANSITÓRIOS ( <i>RINGDOWN</i> ) ...	32
3.2 MÉTODOS QUE SE BASEIAM EM DADOS AMBIENTE.....	35
3.2.1 Métodos que requerem sinal de teste ( <i>probing</i> ) .....	38
<b>4 MÉTODOS VECTOR FITTING E N4SID</b> .....	<b>40</b>
4.1 MÉTODO VECTOR FITTING.....	40
4.1.1 Adaptações propostas no método <i>Vector Fitting</i> no domínio do tempo .....	42
4.2 MÉTODO N4SID .....	47
4.2.1 Fundamentos Teóricos.....	47
4.2.2 Identificação por Subespaços .....	48
4.2.3 Estimando os Subespaços .....	49
4.2.4 Estimação das matrizes do sistema .....	50
<b>5 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS N4SID E VF</b> .....	<b>51</b>
5.1 SISTEMA KUNDUR DE 11 BARRAS.....	51
5.1.1 Sistema mais carregado.....	54
5.1.1.1 Cenário 1 .....	55
5.1.1.2 Cenário 2 .....	56
5.1.1.3 Avaliação comparativa dos resultados obtidos – sistema mais carregado ...	57

5.1.2 Sistema menos carregado.....	60
5.1.2.1 Cenário 3 .....	60
5.1.2.2 Cenário 4 .....	61
5.1.2.3 Avaliação comparativa dos resultados obtidos – sistema menos carregado	63
5.1.3 Discussão dos resultados obtidos através do Método VF e N4SID .....	65
5.2 SISTEMA <i>NEW ENGLAND</i> DE 39 BARRAS .....	66
5.2.1 Cenário 1.....	69
5.2.2 Cenário 2.....	72
5.2.3 Cenário 3.....	74
5.2.4 Cenário 4.....	75
5.2.5 Cenário 5.....	76
5.2.6 Cenário 6.....	78
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>80</b>
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	81
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEP) são compostos, em essência, por usinas geradoras, linhas de transmissão de energia e sistemas de distribuição. Nas últimas décadas, com o crescimento das populações e o acelerado processo de desenvolvimento e expansão da urbanização, as redes de transmissão e distribuição de energia vêm sendo constantemente expandidas para atender à crescente demanda de energia dos setores residenciais, comerciais e industriais. Para o período 2021-2025, a previsão é de um crescimento médio de carga de 3,6% por ano do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro (ONS, 2020).

Como resultado dessa elevação no carregamento e aumento de oferta de geração distribuída, as concessionárias de energia enfrentam desafios como a inclusão em larga escala de fontes geradoras intermitentes de baixa previsibilidade que aumentam a complexidade do sistema, e contingências que levam a perdas nos processos produtivos, oportunidades de negócios, lazer, saúde, reparos e manutenção de equipamentos danificados, e, conseqüentemente, à aplicação de multas ou sanções, por parte de órgãos reguladores ou de defesa do consumidor, às concessionárias (Botelho, 2010).

Para minimizar essas perdas, as empresas de energia desenvolveram a competência necessária no planejamento do SEP, convivendo razoavelmente bem com os desafios em questão. Nesse sentido, baseando-se em projeções de crescimento do produto interno bruto (PIB), de crescimento demográfico e outros indicadores, é possível projetar consumo e demanda com razoável precisão. Porém, novos desafios como eficiência energética, novos hábitos de consumo, geração distribuída e o armazenamento de energia podem modificar esse cenário de planejamento e operação, principalmente na rede das concessionárias de distribuição, nas redes de transmissão e em centrais de geração.

Dessa forma, também são necessárias melhorias constantes nos métodos, tecnologias e instrumentos dedicados ao monitoramento e controle da operação do SEP. Para superar todos esses desafios enfrentados em um SEP e garantir que os requisitos de uma operação adequada do sistema de energia sejam cumpridos, são utilizadas ferramentas como sistemas de supervisão, controle e aquisição de dados (SCADAs).



Por muitos anos, a medição contida no sistema SCADA tradicional tem fornecido informações de sistemas de energia aos operadores do sistema. Essas medições são normalmente atualizadas uma vez a cada 4 a 10 segundos, o que efetivamente provê uma visão de estado estacionário do sistema de potência.

Por outro lado, nos últimos anos, também tem surgido novas tecnologias de monitoramento, operação e controle de SEPs. Nesse contexto, destaca-se a tecnologia de sistema de medição sincronizada de fasores (SMSF), que utiliza avanços em comunicações e a tecnologia GPS (*Global Positioning System*) (Sharma et al., 2016).

O processo de medição sincronizada de fasores tem como objetivo a leitura dos valores de amplitude e de fase (ângulo) das tensões e das correntes do sistema, que são denominados como sincrofasores de tensão e corrente. Estes sincrofasores podem ser utilizados, por exemplo, para fins de análise de distúrbios no sistema, principalmente aqueles relacionados com transitórios eletromecânicos, bem como para suporte ao processo de tomada de decisão em tempo real (ONS, 2020).

SMSFs são agora amplamente implantados em sistemas de monitoramento de área ampla (WAMS) em todo o mundo, e provaram ser um recurso valioso para observar e compreender a dinâmica dos sistemas de potência (CIGRÈ, 2018). Segundo Fan et al. (2019), os WAMSs utilizam tecnologia computadorizada e modernas redes de comunicação digitais de alta velocidade para implementar amostragem síncrona de dados em toda a rede, gravação e transmissão em longa distância, o que serve também como uma plataforma para identificação de perturbações da rede elétrica em tempo real. Assim, ter um WAMS permite obter dados mais detalhados sobre o modo de operação do sistema de energia tanto em um estado estacionário como em transitórios, que ocorrem devido a defeitos ou falhas do sistema de energia (Hadley et al., 2007).

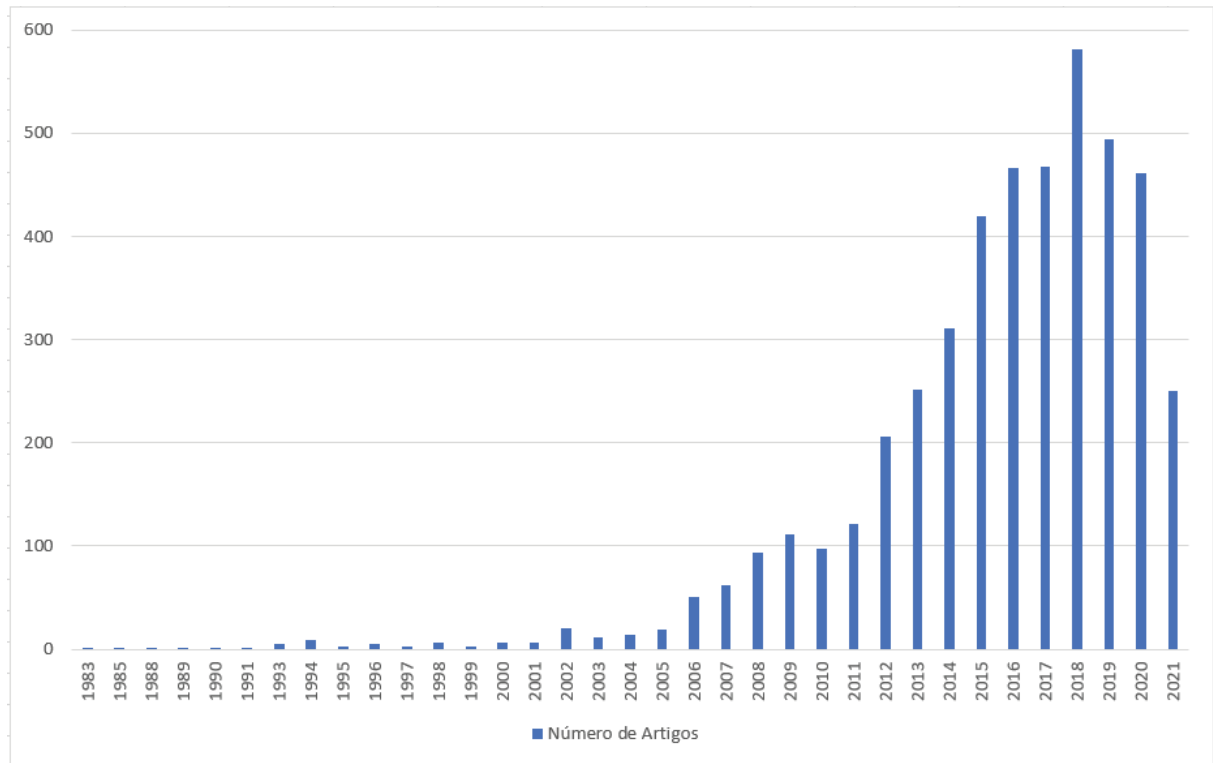
Dessa forma, o WAMS é considerado uma das mais importantes tecnologias no futuro dos sistemas de energia (Sharma et al., 2016). Em sua forma atual, é usado normalmente como uma infraestrutura autônoma que complementa o SCADA tradicional. Essa utilização combinada permitiu modernizar os SEPs ao redor de todo o mundo (Amin et al., 2012). Além disso, “apagões” poderiam ter sido minimizados identificando-se corretamente e rapidamente a linha em falta com a utilização adequada de dados de WAMS (Gajare et al., 2017).

Os equipamentos responsáveis pela implantação de SMSFs em WAMS são as chamadas Unidades de Medição Fasorial (ou PMUs, do inglês, *Phasor Measurement Units*). De fato, as PMUs são dispositivos de aquisição de dados que medem valores de tensão e de corrente com uma referência de tempo comum, que vem da fonte de sincronização fornecida pelo sistema GPS. As PMUs permitem a medição de grandezas fasoriais em instalações geograficamente distantes, e com taxas de amostragem mais altas que o SCADA tradicional. As medições são processadas e convertidas em fasores, com informações de magnitude e fase, e depois, enviadas ao concentrador de dados (Reis, 2019). Assim, as PMUs possibilitam o reconhecimento da dinâmica do sistema em tempo real e o monitoramento e previsão de frequência e estabilidade de tensão do sistema de energia (Aminifar et al., 2014).

Nesse sentido, salienta-se que os WAMSS se distinguem dos tradicionais sistemas SCADA justamente pelo uso de PMUs (Reis, 2019). Processando e filtrando os dados dinâmicos em tempo real de PMUs, aplicações de identificação de perturbação podem obter informações indicativas das características de perturbação e classificar distúrbios, como curtos-circuitos e mudanças de carga, com o objetivo de enviar uma mensagem de alarme para o operador (Fan et al., 2019).

Por fim, cumpre ainda destacar o papel da comunidade científica nacional e internacional no desenvolvimento de aplicações usando WAMSS e suas PMUs. Segundo Aminifar et al. (2014), artigos de pesquisa relevantes apareceram primeiramente nas publicações do IEEE em 1983 e até 2014 vários artigos já foram publicados com atualizações sobre o tema. Como pode ser observado na figura 1, o número de estudos vem aumentando consideravelmente, o que demonstra a importância de desenvolver aplicações envolvendo dados extraídos por PMUs. O gráfico da figura 1 foi construído utilizando dados que constam em Aminifar et al. (2014), para o período de 1983 a 2014. Para os demais anos, a autora realizou uma pesquisa bibliográfica referente a quantidade de artigos que abordam o tema de PMUs.

FIGURA 1 – Distribuição de artigos referente a PMUs ao longo dos anos



FONTE: A autora (2022), adaptado de Aminifar et al. (2014).

## 1.1 UTILIZAÇÃO DE WAMS E PMUS PARA ESTIMAÇÃO DE MODOS ELETROMECCÂNICOS

Dentre as possíveis aplicações que podem ser desenvolvidas a partir dos dados adquiridos por PMUs, insere-se também àquelas relacionadas ao uso desses dados para a estimação de modos eletromecânicos oscilatórios de SEPs.

De fato, oscilações são inerentes a sistemas de energia e, como as redes elétricas estão sendo operadas cada vez mais próximas de seus limites, está se tornando cada vez mais importante monitorar a estabilidade do sistema. Nesse sentido, a taxa de amortecimento dos modos eletromecânicos oscilatórios está intimamente relacionada com a capacidade que um gerador (ou um grupo de geradores síncronos do sistema) possui de manter-se em sincronismo (Thambirajah et al., 2010). O sincronismo depende que o gerador e a rede apresentem, no ponto de conexão, a mesma sequência de fases e diferenças de tensão, frequência e defasagem dentro das respectivas faixas de tolerância. Para tanto, deve ser feito o

uso de dispositivos controladores de tensão e frequência no gerador isolado para que sua inserção não perturbe a rede (Ramalho, 2016). Um modo eletromecânico mal amortecido pode ocasionar um apagão em grande escala no sistema (Thambirajah et al., 2010).

Dessa forma, o monitoramento em tempo real das oscilações por meio dos dados de PMUs é de crucial importância, já que estimando-se os modos eletromecânicos dominantes de um SEP é possível inferir acerca de sua estabilidade (Aminifar et al., 2014).

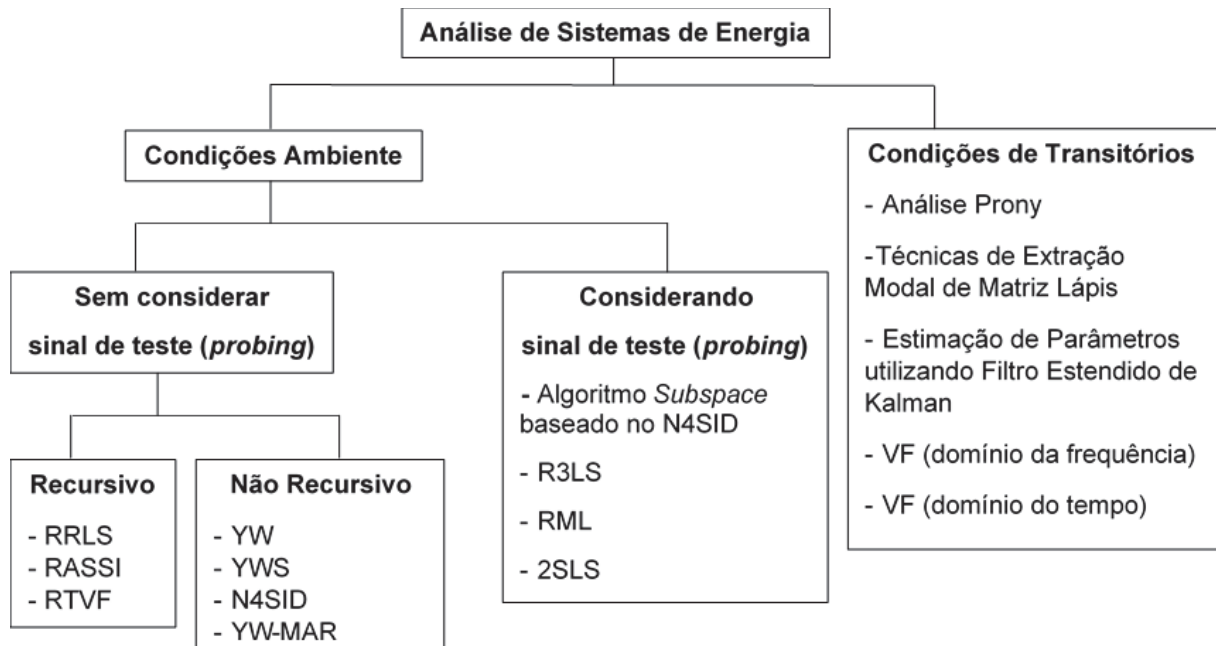
Nesse contexto, existem basicamente duas metodologias para se estimar os modos eletromecânicos de um SEP.

Na primeira, estes modos são estimados baseando-se na linearização das equações que compõem a modelagem do sistema, adquirindo informações qualitativas sobre o comportamento do SEP em torno do ponto de equilíbrio utilizado nessa linearização (Ramos, 2002). Nesse contexto insere-se o programa computacional PacDyn, desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica), que automatiza esse processo de linearização e subsequente cálculo de autovalores (Gomes Junior et al., 2009).

Na segunda metodologia para se estimar os modos eletromecânicos de um SEP, assume-se, em princípio, total desconhecimento acerca dos parâmetros do sistema (parâmetros de barra, de linha, dos geradores e dos seus controladores). Ao invés disso, tais modos são calculados a partir de técnicas de estimação modal que processam sinais elétricos coletados do sistema sob análise. Utilizando, por exemplo, sinais de frequência de operação ou de defasagem angular de tensão extraídos por meio de PMUs, esses métodos de estimação modal são capazes de determinar o amortecimento das oscilações eletromecânicas dominantes do sistema. Em outras palavras isso significa que, através desses dados, é possível estimar os modos eletromecânicos do SEP e, como consequência, monitorar sua estabilidade.

Algumas das principais técnicas de estimação modal que processam sinais elétricos para estimação de oscilações encontram-se apresentadas na figura 2.

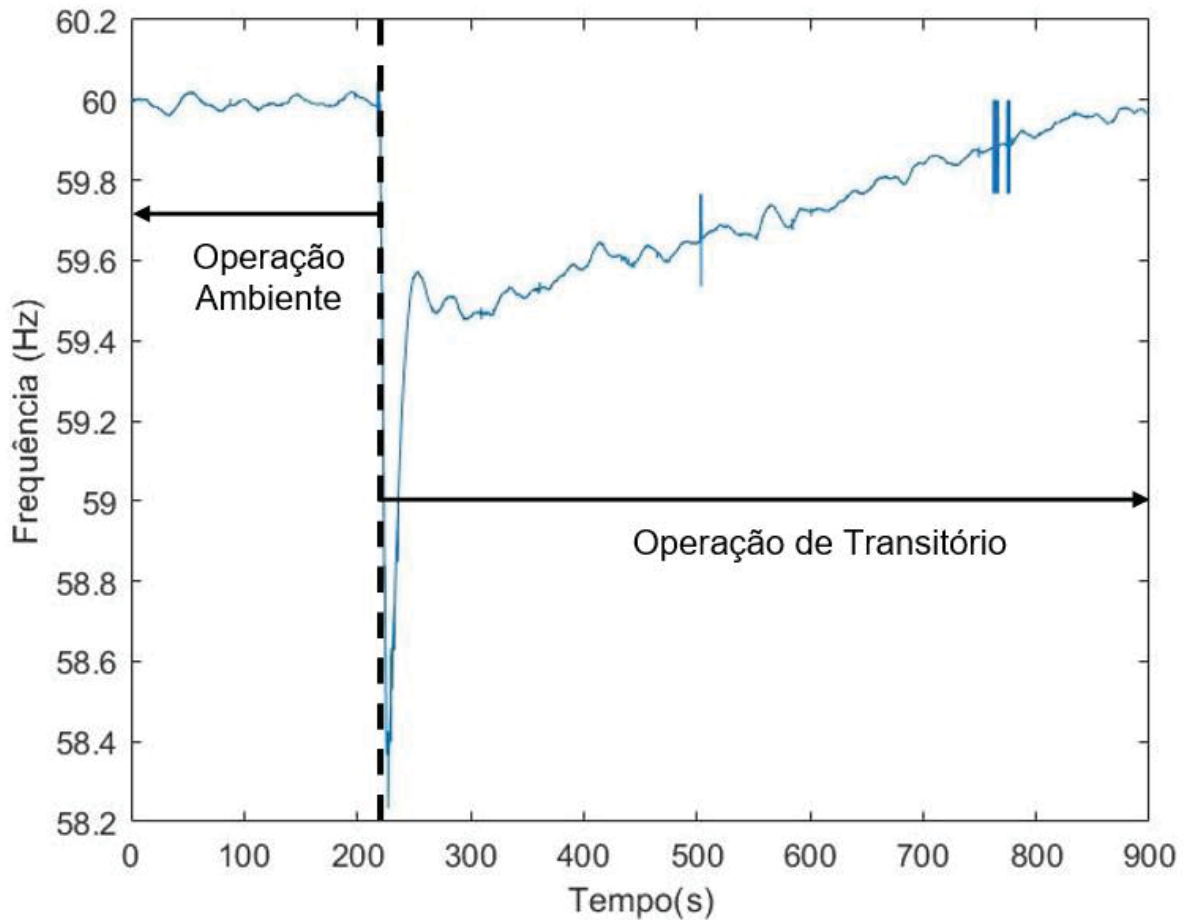
FIGURA 2 – Classificação das técnicas de estimação modal dos sistemas de energia.



FONTE: A autora (2022), adaptado de Thambirajah et al. (2010).

Conforme mostra a figura 2, o primeiro nível de classificação das técnicas de estimação modal se refere a resposta do sistema durante a qual eles são aplicados, as quais podem ser descritas como resposta ambiente e resposta transitória (*ringdown*). As técnicas que se baseiam em dados ambientes são utilizadas em qualquer porção do sinal, ou seja, em casos com variação ambiente, na resposta transitória do sistema ou em ambos (Trudnowski et al., 2008). Essa metodologia se baseia no fato de que SEPs sofrem variações de carga constantemente. Em muitos casos, tais variações já são suficientes para estimular os modos eletromecânicos do SEP (Pierre et al., 1997). Uma característica relevante de métodos nessa classificação é que eles podem ser aplicados no monitoramento de sistemas em tempo real, sendo possível supervisionar o sistema e detectar ocorrências. Por outro lado, aqueles que utilizam dados de *ringdown* estão exclusivamente relacionados com respostas transitórias do sistema, advindas de perturbações que possivelmente alteram o ponto de equilíbrio do sistema. Após cessada essa perturbação o sistema tende a retornar a sua operação normal ou passa a um novo ponto de operação. A figura 3 demonstra um exemplo de uma resposta do sistema sob condições ambiente e de transitório.

FIGURA 3 – Operação de sistemas de energia em condições ambiente e de transitório.



FONTE: A autora (2022).

O presente trabalho irá explorar, ainda, uma outra possível classificação que pode ser feita quanto às técnicas de estimação modal que processam sinais elétricos para estimação de oscilações. Conforme mostrado na figura 2, tal classificação diz respeito à utilização (ou não) de sinais de teste (*probing*).

É possível entender como sinais de teste (*probing*), aqueles sinais elétricos que agem como **entradas do sistema**. Ou seja, sinais de teste podem ser entendidos como sendo os sinais elétricos responsáveis pelo surgimento das oscilações sistêmicas, que por sua vez são observadas nos **sinais de saída** do sistema. Nesse contexto, caracterizam-se como sinais de teste, por exemplo, as potências ativa e reativa de carga em cada barra do sistema. Por outro lado, caracterizam-se como sinais de saída, por exemplo, sinais de frequência de operação, de defasagem angular de tensão, e de fluxo de potência ativa entre linhas do sistema.

Conforme mostrado na figura 2, a maior parte das técnicas de estimação modal não utilizam sinais de teste em sua formulação para estimar os modos oscilatórios. Isso significa que tais técnicas estimam os modos oscilatórios fazendo o uso tão somente de sinais de saída do sistema. Nesse sentido, conforme será enfatizado nas seções seguintes deste texto, o presente documento tem justamente como objetivo contribuir com a comunidade científica, investigando os ganhos passíveis de serem obtidos na estimação de modos oscilatórios quando sinais de teste são incluídos no processo de estimação modal. Especificamente, tal objetivo é atingido no presente documento adaptando a técnica *Vector Fitting* (VF) no domínio do tempo para o contexto de utilização de sinais *probing* no processamento de sinais ambientes. Conforme mostrado na figura 2, até o presente momento tal técnica foi utilizada apenas para um contexto de processamento de dados transitórios.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Sob uma perspectiva mais ampla, sabe-se que os algoritmos iterativos denominados VF, propostos inicialmente em Gustavsen et al. (1999), aparecem na comunidade de sistemas de potência como uma ferramenta poderosa de identificação de sistemas, com aplicações bem-sucedidas em áreas como modelagem de redes equivalentes dependentes de frequência em Ramirez (2009), Ubolli et al. (2011) e Schumacher et al. (2017); modelagem de linhas de transmissão e transformadores elétricos em Gustavsen et al. (1999), Gustavsen (2004) e Gustavsen (2006); e macromodelagem passiva em Grivet-Talocia et al. (2016), Ihlenfeld et al. (2016) e Oliveira et al. (2016).

Entretanto, usando apenas sinais de saída, o método VF foi apenas recentemente adaptado para o contexto de estimação de modos oscilatórios a partir de dados do tipo *ringdown* sem utilizar sinais de teste (*probing*), como apresentado em Papadopoulos et al. (2016), Schumacher et al. (2018) e Schumacher et al. (2019).

A proposta desta dissertação consiste em apresentar a aplicação do Método *Vector Fitting* para a estimação de modos oscilatórios de SEPs, utilizando como sinais *probing* os sinais de potência ativa de carga nos barramentos do sistema, mediante operação do sistema em regime quase-estacionário (dados ambiente). A ideia

consiste em verificar a hipótese de que, nestas condições, este método apresentaria um melhor desempenho do que o de outros métodos que também utilizam sinais *probing* em sua formulação (como o método N4SID, por exemplo).

De fato, o método N4SID será utilizado nesse trabalho para fins de comparação por ser uma técnica vastamente empregada na estimação de modelos de espaço de estados de sistemas multivariáveis e pela facilidade de obter as sequências de estados de um sistema dinâmico diretamente a partir das medições dos dados de entrada e saída (Ricco, 2012). Este método também será utilizado para simulações utilizando múltiplos sinais de entrada e de saída (MIMO), enquanto o método VF será utilizado para simulações utilizando apenas um sinal de entrada e um sinal de saída (SISO).

### 1.3 OBJETIVOS

Dentro do contexto de estimação de modos oscilatórios de sistemas elétricos de potência sob operação em regime quase-estacionário (dados ambiente), o presente documento possui como objetivo geral apresentar os ganhos passíveis de serem obtidos na estimação de modos oscilatórios quando sinais de teste são incluídos como sinais de entrada em técnicas de identificação de sistemas. Para tanto, propõe-se uma modificação no método *Vector Fitting* (VF), que até o presente momento considerava apenas dados de *ringdown* (dados de transitórios) e apresentava um modelo sem sinal de entrada. Nesta dissertação, considera-se como sinais de teste, as variações naturais de potência ativa apresentadas (ao longo do tempo) pelas cargas conectadas às barras do sistema.

Levando em conta este objetivo geral, os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Propor uma adaptação do método VF para a identificação de modos eletromecânicos de SEPs com sinal de teste e avaliar sua aplicabilidade como algoritmo dentro da gama de métodos de estimação de modos oscilatórios disponíveis na literatura atualmente.



2. Realizar um estudo comparativo entre dois métodos de estimação de modos oscilatórios, o N4SID e o VF, em versões com/sem sinais de teste, buscando identificar vantagens e desvantagens de cada um deles nestes dois contextos.
3. Validar as análises em dois sistemas teste, um com 11 barras e outro com 39 barras.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado está estruturada da seguinte forma.

No capítulo 1 é apresentada a introdução deste trabalho e em suas seções são apresentados importantes o conceito como WAMS, PMU, dados ambiente e dados *ringdown*. Além disso, também é apresentada a justificativa e os objetivos deste trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a estimação de modos eletromecânicos em sistemas elétricos de potência.

No capítulo 3 são apresentados os principais métodos de estimação de modos oscilatórios disponíveis na literatura atualmente.

No capítulo 4 são apresentados os métodos empregados nesse estudo. É apresentado o método *Vector Fitting* no domínio do tempo e a modificação proposta nesse método, que consiste na utilização de dados ambiente e um sinal de entrada, chamado de sinal *probing* ou sinal de teste, e o método N4SID.

No capítulo 5 são apresentados os sistemas testes de 11 e 39 barras utilizados para realizar as simulações utilizando os métodos VF e N4SID além dos testes e resultados obtidos.

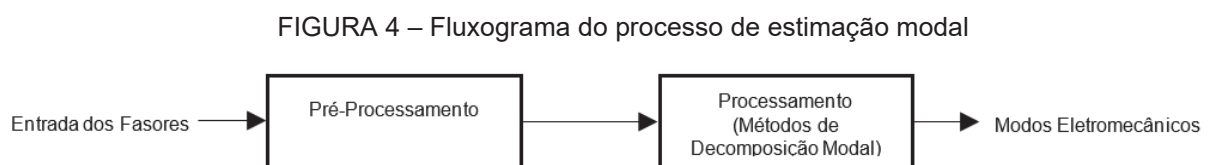
Por último, o capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas nesta dissertação de mestrado e as recomendações para trabalhos futuros.

## 2 ESTIMAÇÃO DE MODOS ELETROMECÂNICOS EM SEPS

Este capítulo traz a metodologia empregada para a estimação dos modos eletromecânicos a partir de dados ambientes extraídos de sistemas elétricos de potência. A aplicação da identificação de modos eletromecânicos para grandes sistemas de energia requer a medição, métodos para o pré-processamento dos sinais medidos, estimação e o ajuste dos parâmetros do método de identificação. A utilização de métodos de decomposição modal para estimar os modos eletromecânicos presentes no sistema necessita de ajustes de parâmetros para que seu funcionamento se dê de forma confiável (Passos et al., 2020). Essas questões são discutidas nesta seção, onde é apresentada a etapa de pré-processamento do sinal ambiente e, em seguida, a estimação dos modos eletromecânicos propriamente dita.

### 2.1 ETAPAS DA ESTIMAÇÃO DE MODOS ELETROMECÂNICOS EM SEP

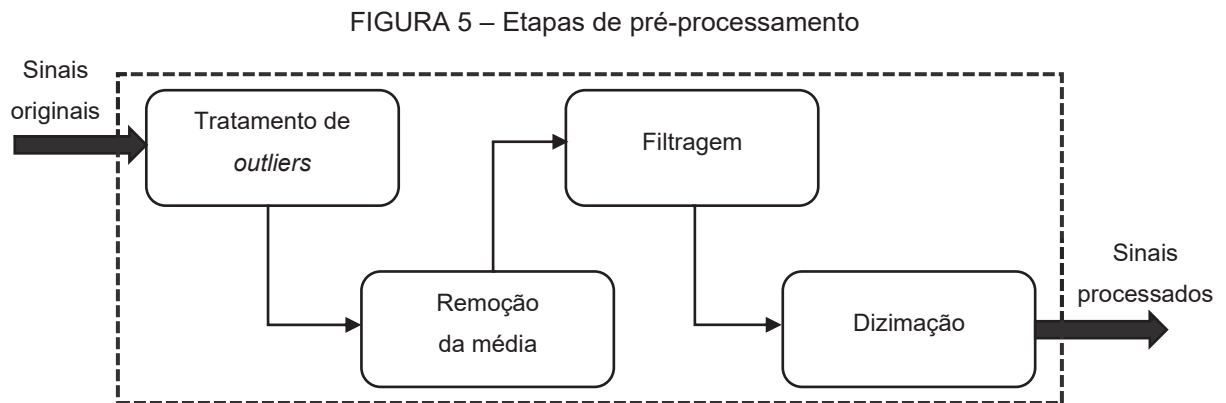
A identificação de modos de oscilação é feita utilizando os sinais temporais obtidos na etapa de monitoramento das grandezas fasoriais. Todavia, antes da aplicação dos métodos, realiza-se o pré-processamento dos sinais para a obtenção de resultados mais confiáveis e precisos (Leandro, 2015). O pré-processamento dos dados consiste nas etapas de remoção de *outliers*, remoção de média, filtragem e *downsampling*. Após isso, aplica-se a estratégia de identificação de modos de oscilação, que envolve a execução de um método de decomposição modal (Decker et al., 2012). O fluxograma apresentado na figura 4 apresenta as etapas da estimação de modos eletromecânicos em SEP.



FONTE: A autora (2022), adaptado de Passos (2020).

## 2.2 ETAPA DE PRÉ-PROCESSAMENTO DO SINAL AMBIENTE

O pré-processamento dos sinais utilizados para a identificação de modos oscilatórios é composto pelos procedimentos apresentados na figura 5.



FONTE: A autora (2022), adaptado de Leandro (2014).

A seleção de sinais obtidos por PMUs consiste no primeiro passo do procedimento de identificação. Para cada PMU selecionada, vários sinais podem ser escolhidos como saídas do sistema para a identificação. Para um WAMS, a tensão, a defasagem angular (ângulo), a frequência e potência ativa e reativa são medidos pelas PMUs. Nesse contexto, a frequência e a defasagem angular são frequentemente usadas na identificação de modos eletromecânicos.

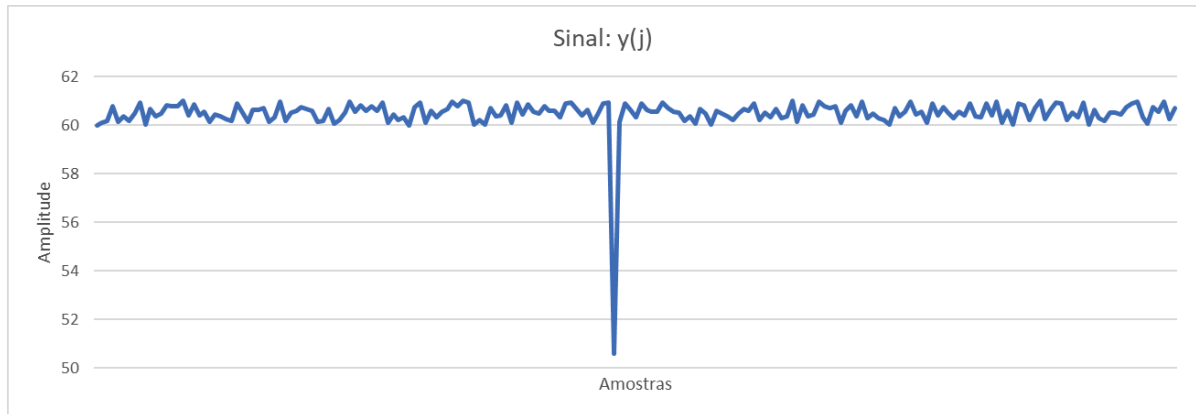
Cumprindo ainda destacar que o tratamento dos sinais amostrados na etapa de pré-processamento melhora o condicionamento numérico dos métodos de decomposição modal, melhorando assim a qualidade das estimativas calculadas (Passos, 2020).

### 2.2.1 Tratamento de *outliers*

Dentre os procedimentos utilizados para a preparação do sinal está a remoção de *outliers*. Um *outlier* em um conjunto de dados pode ser definido como uma observação que é consideravelmente diferente dos demais dados. *Outliers* surgem

devido a falhas mecânicas, alterações no comportamento do sistema, comportamento fraudulento, erro humano, ou simplesmente por meio de desvios naturais nas populações ou medições (Schmitt, 2018). Um exemplo é apresentado na figura 6.

FIGURA 6 – Exemplo de *outlier* em um sinal de frequência



FONTE: A autora (2022), adaptado de Leandro (2014).

Os *outliers* resultam em impactos indesejados em processos de filtragem, induzindo transitórios artificiais nos sinais (Vanfretti et al, 2013). Dessa forma, buscando evitar esse tipo de resultado, os *outliers* devem ser removidos do sinal antes da aplicação de qualquer processo de filtragem (Leandro, 2014).

A remoção de outliers (Leandro, 2015) é feita por um algoritmo que verifica se o valor da amostra se encontra em uma certa faixa de valores, conforme:

$$|MM_j| - \alpha\sigma < |y_j| < |MM_j| + \alpha\sigma$$

onde  $MM_j$  é a média móvel do sinal na amostra  $j$  (neste trabalho calculada por um filtro de média móvel de ordem 4),  $\alpha$  é um número inteiro,  $\sigma$  é o desvio-padrão do sinal e  $y_j$  é a amostra em análise. O valor de  $\alpha$  em geral é ajustado entre 3 e 5. Ou seja, ao escolher  $\alpha = 3$  admite-se que o valor da amostra  $y_j$  desvie no máximo três desvios padrão da  $j$ -ésima média móvel.

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

### 2.2.2 Remoção da média

Em seguida inicia-se a etapa de eliminação das componentes contínuas do sinal. A eliminação da média do sinal é necessária no pré-processamento, uma vez que tendências nos sinais medidos podem degradar os resultados. Além disso, a remoção da média aumenta a relação sinal-ruído (SNR) e, conseqüentemente, as estimativas para os modos oscilatórios (Leandro et al., 2015). Neste trabalho, em certos casos, foi removida a média de sinais, com o intuito de reduzir ruído aleatório, enquanto a forma da resposta é conservada. Porém, em outros casos não foi removida a média do sinal, a fim de evitar possíveis imprecisões nas estimativas oriundas da remoção da média do sinal de entrada.

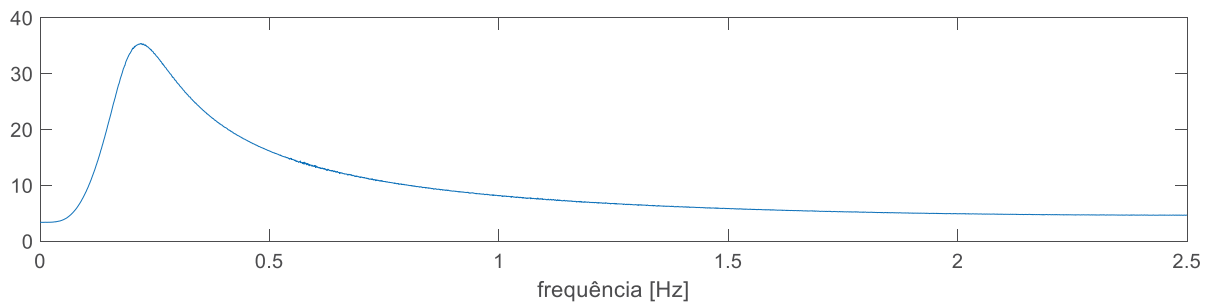
### 2.2.3 Filtragem

A etapa seguinte consiste na filtragem do sinal. Uma vez que a frequência das oscilações eletromecânicas está principalmente na faixa de 0,2 a 8 Hz, as componentes do sinal fora dessa banda podem ser filtradas.

Com isso, pode-se eliminar em grande parte ruídos do sinal, bem como componentes de dinâmica muito lenta, associadas à ação de controladores (Leandro, 2014). A remoção de ruídos aumenta a SNR enquanto a remoção dos modos de controle, de frequências muito baixas, evita grandes diferenças de escala ao empregar a DFT (*Discrete Fourier Transform*), devido às amplitudes relativamente altas desses modos (Vanfretti et al., 2013).

Um exemplo disso é apresentado na figura 7, onde a grande amplitude verificada em uma frequência próxima a zero acaba minimizando a presença de outros modos de oscilação, como o modo em torno de 0,2 Hz.

FIGURA 7 – Espectro de frequências com predominância de modos de baixas frequências



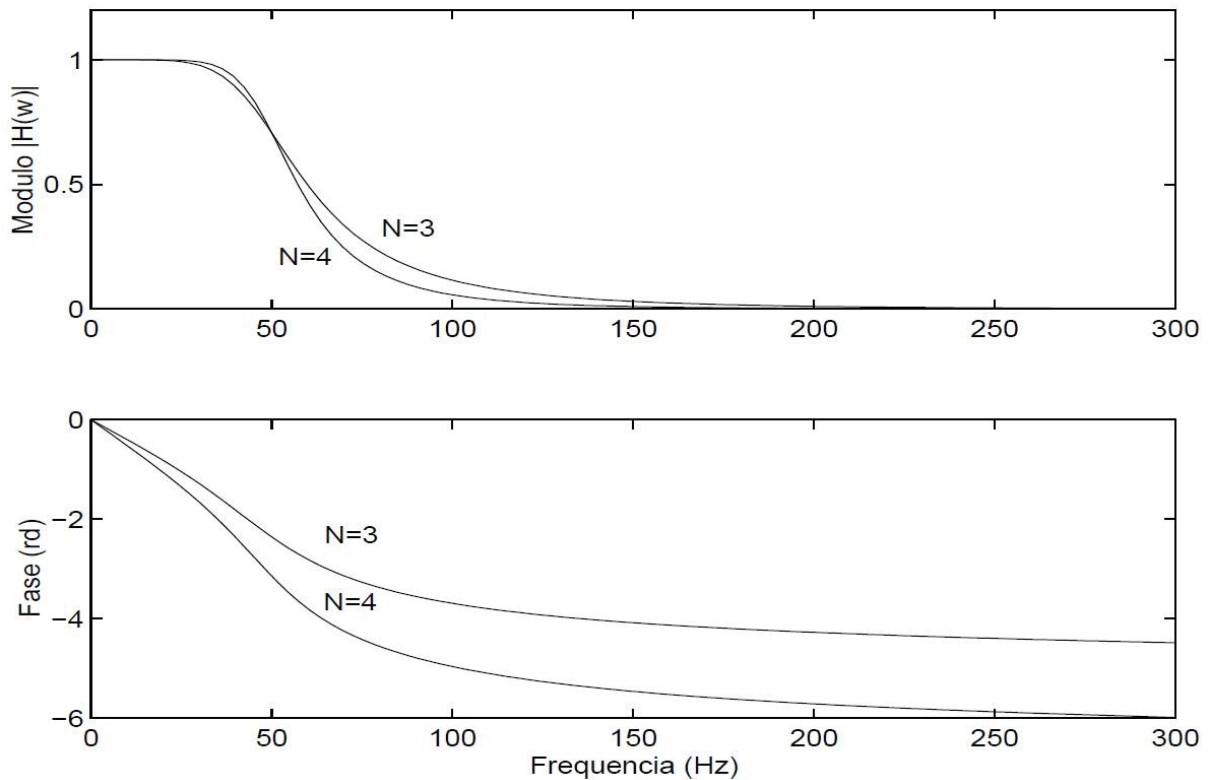
FONTE: A autora (2022)

Para realizar a filtragem neste trabalho foi escolhido um filtro do tipo *Butterworth*. O modelo de filtragem *Butterworth* consiste essencialmente em buscar uma forma adequada para o módulo da função de resposta em frequência e conseqüente escolha apropriada dos parâmetros da equação diferencial correspondente, e com ordens variáveis, de modo a conferir um grau de eficiência crescente ao processo de filtragem (Noronha Neto, 2003).

Segundo Jesus (1992), os filtros de *Butterworth* são especificados de modo a terem uma função de transferência com o mínimo de oscilações tanto na banda passante como na banda de corte. No caso de filtros passa-baixa, o módulo elevado ao quadrado da resposta em frequência do filtro pode ser escrito na forma

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2N}},$$

onde  $N$  é a ordem do filtro e  $\omega_c$  é a frequência de corte inferior equivalente. A partir da equação acima temos que  $|H(\omega_c)| = 1/\sqrt{2}$  e  $|H(0)| = 1$ . Além disso, a inclinação de  $|H(\omega)|$  para  $\omega > \omega_c$  é proporcional a  $(1/\omega)N$ . A figura 8 mostra o módulo das respostas em frequência dos filtros de *Butterworth* numa escala linear e para valores de  $N = 3$  e  $N = 4$ .

FIGURA 8 – Resposta em frequência filtros *Butterworth* para  $N = 3$  e  $N = 4$ .

FONTE: Jesus (1992)

#### 2.2.4 Dizimação (*downsampling*)

A última etapa do pré-processamento do sinal ambiente consiste na reamostragem do sinal, se necessária. A razão pela qual se realiza esta etapa é que taxas de amostragem excessivamente altas não melhoram a estimação de modos, e ainda podem ocasionar problemas numéricos e alta sensibilidade na conversão de polos discretos para polos contínuos (Zhou et al., 2006).

Dessa forma, a amostragem reduzida (*downsampling*) é usada para reduzir o número de amostras. As frequências de interesse, na faixa de 0,2 a 8 Hz para oscilações eletromecânicas, determinam a taxa de amostragem.

Um benefício adicional do *downsampling* é o desempenho computacional aprimorado como resultado da redução de amostras em cada janela de tempo (Leandro et al., 2015). A justificativa é que há uma grande redução no número de dados em uma janela de análise. Por exemplo, considerando a utilização de uma janela de 5 minutos de dados com resolução de 60 Hz, tem-se um total de 18.000

amostras. Adotando nova resolução de 5 Hz, o número total de amostras na janela é reduzido a 1.500 (Leandro, 2014).

### 2.3 ETAPA DE PROCESSAMENTO DO SINAL AMBIENTE

Segundo (Pierre et al., 2012), um sistema elétrico de potência é um sistema não linear, variante no tempo, de ordem elevada e excitado por muitas entradas aleatórias desconhecidas. De acordo com (Kundur, 1994) e (Rogers, 2000), para estudos de pequenos sinais, estas dinâmicas podem ser linearizadas sobre um ponto de operação. Neste contexto, os pequenos movimentos das variáveis elétricas do sistema podem ser descritos por:

$$\dot{\underline{x}}(t) = A\underline{x}(t) + B_L\underline{q}(t) + B_E\underline{u}_E(t) \quad (1)$$

$$\underline{y}(t) = C\underline{x}(t) + D_L\underline{q}(t) + D_E\underline{u}_E(t) + \underline{\mu}(t)$$

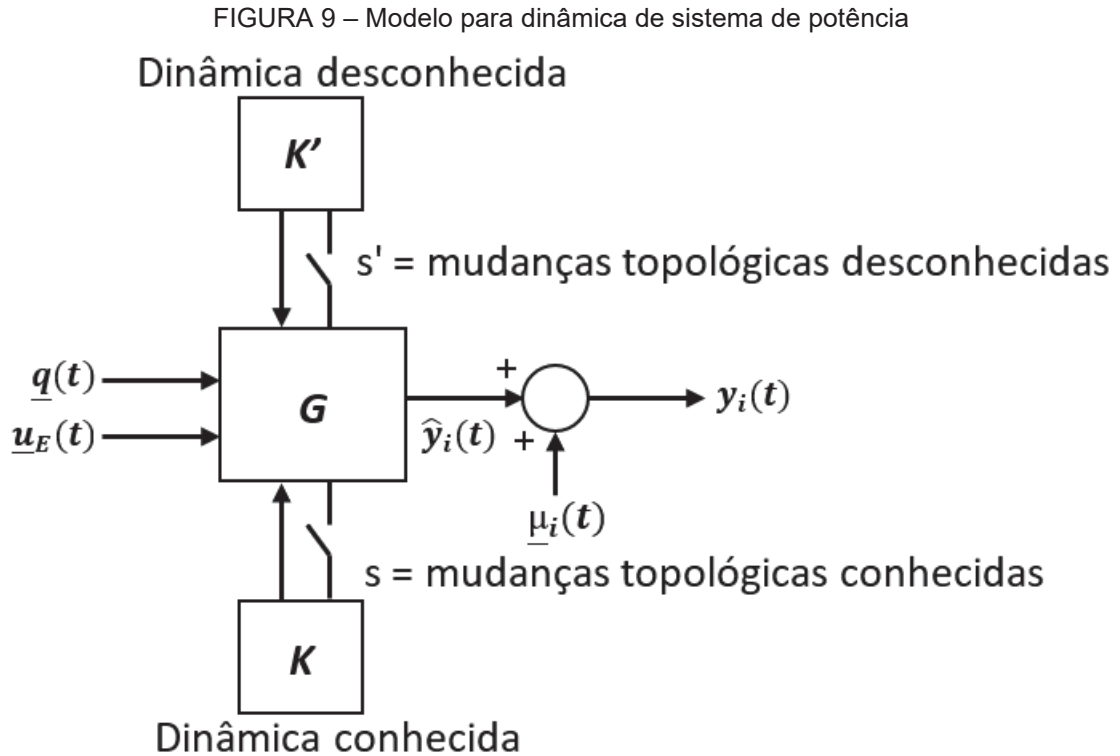
onde  $\underline{q}$  é um vetor aleatório hipotético que perturba o sistema e que representa cargas e demais entradas aleatórias do sistema. O vetor  $\underline{x}$  contém todos os estados do sistema, incluindo ângulos e velocidades dos geradores. A variável  $t$  representa o tempo. Já  $\underline{y}$  representa o vetor de medidas do sistema. As ações de controle (neste contexto também conhecidas como *probing*) são representadas pelo vetor de entradas exógenas  $\underline{u}_E$ . Essas ações incluem mudanças de ponto de ajuste, sinais de teste de baixo nível e/ou pulsos de carga que são aplicados para examinar a dinâmica do sistema. Os sinais mensuráveis normalmente contêm ruído de medição  $\underline{\mu}$  advindos dos instrumentos, canais de comunicação, sistemas de gravação, dentre outros dispositivos semelhantes.

Segundo Pierre et al. (2012), os modos eletromecânicos são um subconjunto de autovalores da matriz do sistema  $A$ . Tanto a frequência de um modo quanto a taxa de amortecimento são encontradas a partir dos autovalores. De acordo com (Kundur, 1994), os modos eletromecânicos são geralmente classificados como locais ou modos inter-áreas.

Uma perspectiva mais ampla do sistema é mostrada na figura 9, onde  $y_i(t)$  é o  $i$ -ésimo elemento de  $\underline{y}(t)$  em (1). O sistema  $G$  de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) é considerado linear. Mudanças de topologia conhecidas e



desconhecidas são representadas na figura por interruptores e as matrizes de ganho dinâmico  $K$  e  $K'$ , respectivamente.



FONTE: A autora (2022), baseado em Pierre et al. (2012).

A resposta do sistema na figura 9 pode ser classificada como ambiente, transiente ou resultado de sinal de teste (*probing*).

Os sistemas de energia são continuamente excitados por muitas entradas aleatórias distribuídas por todo o sistema. A suposição para  $\underline{q}$  é conter perturbações aleatórias de pequena amplitude, conceituado como comutação de carga produzida por ruído branco. Foi considerado como hipótese que a comutação de carga consiste principalmente em ruído aleatório com frequência na faixa dos modos eletromecânicos com cada elemento de  $\underline{q}$  independente. Isso resulta em uma resposta em  $\underline{y}$  que é colorida pela dinâmica de  $G$ . Uma resposta transitória é tipicamente maior em amplitude e é causada por uma mudança repentina em  $s$ ,  $s'$  ou na entrada de pulso em  $\underline{u}_E$ . A resposta no domínio de tempo resultante é uma oscilação multimodal sobreposta com a resposta ambiente (Pierre et al., 2012).

Dessa forma, o problema que se apresenta aqui é a estimação dos autovalores do sistema (1), tendo-se como base medições para  $\underline{u}_E$  e  $\underline{y}$ , de modo que os modos eletromecânicos possam ser identificados.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar um histórico das técnicas de estimação de modos eletromecânicos. Assim, inicialmente são abordados os métodos que se baseiam em dados transitórios (*ringdown*). Na sequência são discutidos os métodos que se baseiam em dados ambiente. Dentre os métodos que se baseiam em dados ambiente, são apresentados os métodos que não utilizam um sinal de teste e, por fim, os métodos que utilizam um sinal de teste.

#### 3.1 MÉTODOS QUE SE BASEIAM EM DADOS TRANSITÓRIOS (*RINGDOWN*)

Na literatura verifica-se o desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de estimação de modos eletromecânicos já consagradas. No contexto dos métodos que se baseiam em dados transitórios, Hauer et al. (1990) abordaram a análise Prony, que estendia a análise de Fourier estimando diretamente a frequência, amortecimento, potência e fase relativa de componentes modais presentes em um dado sinal transitório. Essa técnica reconstrói o sinal a partir de um modelo paramétrico, através da decomposição da resposta temporal em uma soma de senoides amortecidas. O tradicional método de análise Prony assumia o sistema como uma saída simples e os sinais individuais eram analisados independentemente, muitas vezes resultando em estimativas de frequência e amortecimento conflitantes, devido aos efeitos do ruído. Segundo Hauer et al. (1990), esse método também apresentou resultados com alguns desvios, especialmente no cálculo das taxas de amortecimento dos modos oscilatórios, evidenciando que o método encontra dificuldades para estimar modos bem amortecidos.

Desenvolvendo melhorias na análise Prony, Trudnowski et al. (1999) propuseram uma modificação do método para múltiplos sinais de saída, considerando uma extensão simples que permite que vários sinais sejam analisados simultaneamente, resultando em um conjunto único de estimativas de modos oscilatórios do sistema. Esta extensão melhorava a precisão de estimativas modais e simplificava as etapas de análise.

Buscando simplificar ainda mais essas etapas de análise, foi apresentado em Crow et al. (2005) o método de extração modal de matriz lápis (ou, *matrix pencil*, do inglês), que estima os modos oscilatórios a partir do cálculo dos autovalores de modelos de ordem reduzida de grandes sistemas não lineares, baseados em suas respostas dinâmicas. Apesar dos sistemas de energia serem modelados como grandes, complexos e não lineares, esse método buscava extrair a informação modal diretamente da resposta do sistema a uma perturbação. Usando esta abordagem, foi possível substituir o modelo dinâmico real com um modelo linear estimado que é derivado da forma de onda do sinal de saída do sistema.

Os métodos passaram a ser cada vez mais aprimorados para fornecer informações vitais sobre a estabilidade do sistema. Com esse intuito, foi estudado o problema da estimação de parâmetros, constantes e variantes no tempo, de sinais transitórios com ruído branco, utilizando um filtro estendido de Kalman (Yazdanian et al., 2015), que foi projetado para fornecer estimativa direta de frequência e fator de amortecimento de um único sinal de *ringdown*. Esse algoritmo foi adequado para sistemas digitais e aplicações em tempo real devido à sua baixa carga computacional e performance satisfatória. As dinâmicas dominantes podiam conter as contribuições de vários modos, que, se suficientemente dominantes, poderiam ser estimados pelo algoritmo proposto. Segundo Yazdanian et al. (2015), a performance do algoritmo foi confirmada utilizando dados reais e simulados somente de transitórios. Dados ambiente e de *ringdown* de múltiplas medições não foram considerados.

Buscando estimar o modo dominante contido nas respostas de *ringdown* de sistemas de potência, foi proposto em Papadopoulos et al. (2016) uma aplicação do método *Vector Fitting* (VF), que havia sido inicialmente proposto em Gustavsen, Semlyen (1999) para estimação de respostas em frequências. A partir da análise e comparações com os outros métodos conhecidos, diversas vantagens e características distintas do método proposto para a identificação do modo oscilatório foram verificadas. O método demonstrou alta precisão e pequena variação das estimativas de modo de respostas simuladas e dados distorcidos, principalmente quando comparado com a Análise Prony e aplicação direta da Transformada Rápida de Fourier (FFT). O método também apresentou identificação automática dos modos dominantes contidos no *ringdown*, enquanto outros métodos exigiam modos artificiais adicionais para melhorar a precisão da estimativa do modo em casos de dados distorcidos. O algoritmo apresentou alta eficiência numérica, resultando em tempos

de execução significativamente baixos para taxas de amostragem de até 100 amostras por segundo suportadas pela maioria das PMUs, revelando a viabilidade do método proposto para aplicações online (Papadopoulos et al., 2016). Esse método baseado na técnica VF exige o cálculo do espectro do sinal antes da identificação do sistema, aumentando o tempo de execução do procedimento. No entanto, a maioria das PMUs modernas inclui recursos de FFT internos, eliminando esta desvantagem inerente do VF, enquanto simultaneamente reduz a quantidade transmitida de dados e a carga computacional no centro de controle. Dessa forma, esse método foi considerado uma ferramenta confiável e adequada para o monitoramento online e análise quase em tempo real das respostas de *ringdown* obtidas pelas PMUs (Papadopoulos et al., 2016).

Dando continuidade ao estudo do método *Vector Fitting*, foi introduzido em Schumacher et al. (2019) o método *Vector Fitting* no domínio do tempo, de múltiplos sinais, que foi capaz de modelar múltiplos sinais de transitórios simultaneamente, fornecendo desempenho de adaptação superior do que a abordagem de único sinal RTD-VF (do inglês, *ringdown time-domain vector fitting*). Além disso, o RTD-VF de múltiplos sinais gerou estimativas mais realistas para sistemas de energia complexos, uma vez que múltiplos sinais de *ringdown* possivelmente distribuídos em diferentes locais podem ser simultaneamente utilizados durante a estimação modal. Enquanto isso, o método de sinal único RTD-VF gerou estimativas que são naturalmente mais relacionadas com a seção particular do sistema em que o sinal em modelagem foi medido. Também foi proposta uma extensão baseada em variáveis instrumentais (ou IV, do inglês, *instrumental variables*) do método multi-sinais *Vector Fitting* no domínio do tempo (RTD-VF). Esse método garantiu um ótimo local depois que o algoritmo convergia, e a formulação multi-sinais desse método foi usada para refinar estimativas fornecidas pelo método regular multi-sinais *Vector Fitting* no domínio do tempo (RTD-VF). Além disso, resultados também mostraram que IV-RTD-VF foi capaz de fornecer estimativas com polarização reduzida ao modelar medições de *ringdown* corrompidas por ruído colorido.

### 3.2 MÉTODOS QUE SE BASEIAM EM DADOS AMBIENTE

Diferentemente dos métodos de análise de dados transitórios, os métodos de análise de dados ambiente são minimamente invasivos, visto que para sua aplicação não é necessária a ocorrência de uma perturbação no sistema. Existem dois tipos básicos de algoritmos de estimativa de modo de dados ambiente: processamento em bloco e recursivo. Com algoritmos de processamento em bloco, os modos são estimados a partir de uma janela de dados. Para cada nova janela de dados, uma nova estimativa é calculada.

Devido à necessidade de utilizar não somente dados de transitórios, mas também dados ambiente para estimar modos eletromecânicos e facilitar a operação do sistema, foi indicado em Pierre et al. (1997) ser possível estimar as mesmas características estimadas pelo método de Análise Prony de um sistema eletromecânico simplesmente através de dados ambiente, utilizando processamento em bloco. Esse método estava fundamentado no fato de que o sistema está sujeito a constantes mudanças aleatórias, como variações nas cargas, que podem fornecer pequenos estímulos aos modos eletromecânicos. Esse estudo foi comparado com o método de Análise Prony e foram levantados alguns pontos em comum. Ambos os métodos assumem modelos lineares em relação a um ponto de operação, ambos consideram uma função que é a soma de exponenciais de amortecimento e uma estrutura de predição linear. Além disso, ambos envolvem a solução de um problema dos mínimos quadrados e superestimam a ordem do polinômio característico.

Aprimorando o método apresentado em Pierre et al. (1997) para estimar modos eletromecânicos quase em tempo real, Trudnowski et al. (2008) avaliaram três algoritmos não recursivos: o estendido e modificado *YuleWalker* (YW), o estendido e modificado *YuleWalker* com análise espectral (YWS) e o sistema de identificação *subspace* (N4SID). Dentre esses três algoritmos, os algoritmos YW e YWS forneceram uma estimativa precisa de modos eletromecânicos, enquanto o N4SID necessitou de uma janela de dados maior para atingir uma precisão igual a dos outros dois algoritmos. Os três algoritmos tiveram ótimo desempenho durante um transitório, demonstrando até que o seu desempenho melhorou se entre os dados estivesse presente dados de *ringdown*. E para os três algoritmos, dados faltantes não causaram prejuízos significativos na estimação de modos eletromecânicos.

Com base no estudo de Trudnowski et al. (2008) do algoritmo YW, Seppänen et al. (2013) introduziram o uso da estimativa multicanal *YuleWalker* (YW) de um modelo autorregressivo multivariado (MAR) para a análise modal baseada em medição de sistemas de energia. O método YW-MAR utilizava medições recebidas de um sistema de monitoramento de área ampla (WAMS) e seus parâmetros de estimativas de modo fornecidos pelo YW-MAR não eram significativamente afetados por medições com ruído ou perda de sinais de medição. Foi demonstrado que a estimativa da frequência era precisa até mesmo quando a janela de processamento de bloco era pequena, porém a estimativa da taxa de amortecimento era afetada negativamente e era exigido um determinado volume de medições para fornecer uma estimativa precisa. Assim, o método YW-MAR demonstrou ser uma técnica promissora para monitoramento de área ampla de sistemas de energia, apesar de não ser possível aplicá-lo para o monitoramento em tempo real dos sistemas de energia.

Baseado no método N4SID, foi proposto em Ni et al. (2012) uma revisão desse método introduzindo canais de referência, que estimavam os modos e formas simultaneamente com grande eficiência computacional, sem prejudicar a precisão dos resultados. Para discriminar os modos reais dos adulterados, foi introduzido um diagrama de estabilização e um novo algoritmo foi projetado para lidar com esse diagrama, que pode detectar os modos reais automaticamente. Esse método teve bom desempenho em termos de eficiência e precisão computacional e apresentou o potencial de ser usado em tempo real. A maioria dos métodos publicados anteriormente lidava com formas e modos separadamente. Nesse método, foi possível obter convenientemente as formas correspondentes aos modos, que é a vantagem especial do método N4SID.

Os métodos que se baseiam em dados ambiente acima descritos são métodos não recursivos, pois recalculam uma nova solução para cada conjunto (bloco) de novos dados. Métodos recursivos são aqueles em que uma nova estimativa para os parâmetros do modelo é gerada para cada nova amostra de dados, levando-se em conta também a estimativa já existente (Thambirajah et al., 2010).

Dessa forma, dando continuidade ao estudo de métodos que se baseiam em dados ambiente, mas também buscando a estimação em tempo real de modos de sistemas elétricos baseado em dados medidos, foi proposto em Zhou et al. (2007) um robusto e recursivo método dos mínimos quadrados, o método RRLS. Esse método conseguiu identificar os modos oscilatórios tanto de dados ambientes como de

transitórios mesmo com valores discrepantes e dados faltantes, em tempo real, sem prejudicar a sua performance. O algoritmo RRLS foi implementado de forma eficiente e acompanhou requisitos de fluxo de dados típicos. Esses resultados indicaram que o algoritmo RRLS oferece um grande potencial para estimativa de modo online para o monitoramento do modo de sistema de energia em tempo real.

Visando aprimorar o método N4SID, foi proposto em Sarmadi et al. (2014) o algoritmo RASSI de identificação recursivo, adaptativo, estocástico para monitoramento em tempo real de modos eletromecânicos de baixa frequência em sistemas de energia, utilizando dados ambiente e de transitórios, de unidades de medição fasorial sincronizada de grande extensão. O método *subspace* fornecia uma estimativa precisa de modos do sistema, enquanto a versão recursiva facilitava a aplicação em tempo real. O método RASSI proposto usa um algoritmo de seleção adaptativa de duas implementações paralelas que usam dois fatores de esquecimento diferentes para tornar o estimador mais flexível em lidar tanto em estado quase estacionário como quando há uma mudança lenta ou repentina nas condições do sistema, como os casos de rampa e degrau.

Aprofundando a abordagem do Método *Vector Fitting*, que apenas considerava dados de transitórios, foi proposto em Bradde et al. (2020) um novo procedimento, denominado *Real-Time Vector Fitting* (RTVF), que realizava modelagem dinâmica linearizada em tempo real. O algoritmo RTVF foi aplicado em uma ampla gama de sistemas dinâmicos de engenharia e foi desenvolvido especificamente para executar modelagem da dinâmica do gerador em tempo real, considerando perturbações ambientais. Além disso, o método RTVF pode ser aplicado em face de sinais de entrada simultaneamente ativos, uma vez que esta é uma restrição prática para qualquer componente do sistema de energia trifásico modelado usando uma aproximação fasorial quase estacionária em seus terminais.

Dada a implantação em larga escala de PMUs, o RTVF fornece aos operadores do sistema de energia uma ferramenta valiosa. Essa ferramenta, por exemplo, pode construir modelos em tempo real de sistemas geradores cujos modelos físicos anteriores são completamente desconhecidos. Ele também pode validar ou aprimorar modelos anteriores que são supostamente bem conhecidos. Além disso, uma vez que os parâmetros do controlador são frequentemente alterados em nível local sem consciência do operador do sistema, RTVF pode ser usado para inferir o verdadeiro valor desses parâmetros em tempo real. Tal capacidade permite aos



operadores de sistema manter a estabilidade de pequenos sinais e garantir que os geradores estão aderindo adequadamente às regulamentações do mercado.

### 3.2.1 Métodos que requerem sinal de teste (*probing*)

Os métodos anteriormente descritos não requerem um sinal de teste (*probing*) e assumem a entrada como desconhecida (Thambirajah et al., 2010). Mas em muitos casos, a medição autônoma dos sinais de PMU pode não ser suficiente para a devida estimação de modos eletromecânicos.

Para auxiliar neste sentido, um sinal teste (*probing*) pode ser introduzido no sistema e medido concomitantemente com os sinais de PMUs. Em alguns casos, esse sinal é tratado como sendo a injeção de um distúrbio externo, por meio de uma grande carga, e concomitante medição da resposta do sistema. Em outros, o sinal de teste (*probing*) pode ser considerado como a variação da carga ou até mesmo um evento do sistema, sendo tomado como uma entrada do mesmo, enquanto as medições de frequência e tensão permanecem como saídas do sistema. Um exemplo desta estratégia (Thambirajah et al., 2010) consiste em calcular a resposta do sistema a partir de técnicas tradicionais de identificação de sistemas baseadas em mapeamentos do tipo entrada-saída, ou seja, a partir de métodos de identificação que consideram a(s) entrada(s) do sistema como sendo conhecida(s).

Usando essa estratégia e com o intuito de facilitar a obtenção de informações sobre o amortecimento do sistema, Zhou et al. (2006) exploraram a estimação dos modos eletromecânicos de um sistema elétrico de potência através de algoritmos do tipo *subspace*, isto é, o N4SID (*numerical algorithms for subspace state space system identification*). Dois tipos gerais de sinais *probing* foram considerados - sinais breves de nível médio que sondaram modos únicos e sinais mais longos de baixo nível que sondaram todos os modos entre áreas. Os resultados com N4SID foram consistentes com a Análise Prony de inserções de freio e com a análise de sinais ambiente sob condições semelhantes. O N4SID é simples de aplicar, contém um pacote integrado que pode ser usado com ou sem um sinal *probing* e o pacote também contém a lógica da análise Prony como um subconjunto.

Também utilizando um sinal de teste, foi apresentado em Dosiek et al. (2013b), o método 2SLS (*two-stage least squares algorithm*). Assim como o algoritmo

N4SID, esse método pode incorporar diretamente o sinal de teste (*probing*) no algoritmo, apresentando precisão, resultados similares e pequenas variações, sem erros sistemáticos.

Aprimorando a ideia do algoritmo N4SID e buscando reduzir a influência de dados atípicos, também foi proposto em Zhou et al. (2008) um método robusto, regularizado e recursivo dos mínimos quadrados, o método R3LS (do inglês, *recursive robust regularized least squares*). Neste método, uma função objetivo foi utilizada para reduzir a influência negativa de dados atípicos, que incluem valores discrepantes e dados faltantes. Esse método ajudou a incluir informações já conhecidas sobre o sistema e reduzir a influência de problemas indeterminados, utilizando efetivamente dados típicos e atípicos. As respostas de transitórios e sinais de teste de baixo nível podem ajudar a melhorar a precisão da estimativa do modo. Dados ausentes e valores discrepantes não produziram degradação perceptível de desempenho nos níveis estudados. Além disso, o R3LS pode rastrear modos de variação lenta.

De forma similar, em (Dosiek et al., 2013a), o algoritmo RML (*recursive maximum likelihood estimator*) demonstrou ser um método capaz de estimar modos eletromecânicos em tempo real e rastrear mudanças no sistema. Este algoritmo utiliza um estimador de máxima verossimilhança recursivo para fornecer não só uma estimativa dos modos eletromecânicos, mas também os limites de erro, informação que não era fornecida pelo método R3LS. As estimativas de variação foram realizadas utilizando duas aproximações de series de Taylor de modelo fechado multidimensionais. O método foi aplicado com sucesso aos dados coletados de PMUs sob condições ambiente e de sinais de teste, demonstrando ser uma ferramenta poderosa para operadores de sistema interpretarem e utilizarem as estimativas de modo.

Neste trabalho serão utilizados dois métodos de estimação de métodos eletromecânicos: o método *Vector Fitting* e o método N4SID. Será proposta uma adaptação no método *Vector Fitting*, para utilização de dados ambiente, juntamente com um sinal de teste. Já o método N4SID será utilizado com e sem um sinal de teste, com o intuito de comparar os resultados obtidos através do método VF. Ambos os métodos serão descritos no próximo capítulo.

## 4 MÉTODOS *VECTOR FITTING* E N4SID

Este capítulo tem como objetivo apresentar os métodos de estimação de modos eletromecânicos *Vector Fitting* e N4SID, bem como seus algoritmos. Na seção 4.1 é apresentado o método *Vector Fitting* e a adaptação deste método que é proposta neste trabalho. Na seção 4.2 é apresentado o método N4SID. Estes métodos serão utilizados nas simulações ao longo deste estudo.

### 4.1 MÉTODO *VECTOR FITTING*

O método *Vector Fitting* inicialmente proposto por Gustavsen et al. (1999) é tido na literatura como um método de referência na identificação de sistemas com base em funções racionais. O método consta de dois passos, em que são resolvidos dois sistemas de mínimos quadrados linear. Inicialmente, distribuem-se polos estáveis sobre o intervalo de frequência em que se deseja ajustar a função. Neste método existem dois passos claramente definidos: o ajuste de polos e a determinação de resíduos.

Os algoritmos VF tornaram-se populares especialmente em sistemas de energia e comunidades de microeletrônica (Schumacher, 2019), pois podem fornecer estimativas satisfatórias para polos de funções de transferência de estruturas de modelo de erro de saída (Grivet-talocia et al., 2016; Ubolli et al., 2011; Gustavsen, 2006; Gustavsen et al., 1999). No caso de sistemas de potência, as aplicações bem-sucedidas de VF abrangem as seguintes áreas: modelagem de frequência – redes equivalentes dependentes para análise de transientes (Schumacher et al., 2017; Ubolli et al., 2011; Ramirez, 2009), modelagem de banda larga de linhas de transmissão e transformadores (Gustavsen, 2006; Gustavsen, 2004; Gustavsen et al., 1999), estimação de modos eletromecânicos (Schumacher et al., 2019; Schumacher et al., 2018; Papadopoulos et al., 2016) e macromodelagem passiva (Grivet-Talocia et al., 2016; Ihlenfeld et al., 2016; Oliveira et al., 2016).

Nos algoritmos VF, as funções de transferência são representadas por meio de uma combinação linear de funções de base racional (RBFs – do inglês *Rational*

*Basis Functions*) (Schumacher, 2019). De certa forma, esses algoritmos também podem ser entendidos como reformulações robustas das iterações originais de Sanathanan-Koerner (Sanathanan; Koerner, 1963) e Steiglitz-McBride (Steiglitz; McBride, 1965) (Hendrickx; Dhaene, 2006), que, por sua vez, representam funções de transferência por meio de uma razão entre polinômios.

Ao fazer uso de frações parciais de tempo contínuo como RBFs, o método VF foi inicialmente proposto em Gustavsen et al. (1999) e Gustavsen (2002) no domínio da frequência (FD-VF – do inglês, *Frequency Domain Vector Fitting*), ou seja, para estimar modelos baseados em dados no domínio da frequência. Alguns anos depois, várias modificações e melhorias foram incorporadas a esta abordagem padrão VF no domínio da frequência (FD-VF). Dentre essas melhorias estão alguns aprimoramentos numéricos para uma convergência mais rápida (Deschrijver et al., 2008; Knockaert, 2009) e também o chamado relaxamento VF (Gustavsen, 2006). O FD-VF atingiu a chamada forma vectfit3, encontrada em Package (2008), que ainda é uma das implementações mais populares do FD-VF.

Em Deschrijver et al. (2007), os autores introduziram outro algoritmo FD-VF padrão, conhecido como VF Ortonormal, que consiste em substituir as frações parciais originais pelas funções de base ortonormal Takenaka-Malmquist de tempo contínuo (Schumacher et al., 2018). Conforme mencionado em (Deschrijver et al., 2007; Nouri et al., 2010), a melhoria no condicionamento numérico é considerada como um dos benefícios do uso funções ortonormais como RBFs. Em Schumacher et al. (2015), o uso de funções de base de localização de frequência como RBFs também é estudado no contexto de FD-VF. Equivalentes em tempo discreto desses algoritmos FD-VF podem ser encontradas, por exemplo, em (Nouri et al., 2010; Wong et al., 2008; Mekonnen et al., 2007).

Quando se trata de identificação do sistema com base em dados no domínio do tempo, o método VF em tempo contínuo introduzido por (Grivet-Talocia, 2003) permanece como uma das técnicas mais adotadas. No entanto, como os conjuntos de dados no domínio do tempo estão sempre na forma de amostras de tempo discreto (o que significa que os sinais são conhecidos apenas em instantes de tempo discreto), a implementação prática de tal método VF no domínio do tempo (TD-VF) depende de uma aproximação numérica de integrais de convolução (Grivet-Talocia et al., 2016; Ubolli et al., 2011; Grivet-Talocia, 2003).

Para lidar com essa questão, em Schumacher et al. (2017) o método TD-VF foi formulado diretamente em uma estrutura discreta no domínio do tempo cuja implementação prática não depende da aproximação de integrais de convolução. Essa abordagem alternativa também permite que o TD-VF possa ser facilmente usado não apenas com frações parciais, mas também com conjuntos RBF mais gerais, como funções de base ortonormal de Takenaka–Malmquist de tempo discreto (Schumacher et al., 2018; Heuberger et al., 2005; Van Den Hof et al., 1995).

Conforme discutido em Schumacher et al. (2017), os algoritmos TD-VF e FD-VF se beneficiam da representação de estruturas de modelo de erro de saída (OE – do inglês *Output Error*) baseadas em RBF em uma estrutura de espaço de estado. Nesse sentido, Schumacher et al. (2018) propõem um método unificador que pode ser aplicado para construir conjuntos RBF de tempo contínuo e discreto. Em particular, o método construtivo proposto em (Schumacher et al., 2018) é projetado para encontrar matrizes caracterizantes de equações de estado RBF lineares, sendo expressões analíticas para a realização de tais matrizes de espaço de estado também desenvolvidas nesta referência. Também é observado que, embora os algoritmos de VF estejam focados em identificar sistemas, as equações de estado RBF lineares também podem ser aplicadas na modelagem de sistemas não lineares (Schumacher et al., 2016).

#### 4.1.1 Adaptações propostas no método *Vector Fitting* no domínio do tempo

Esta dissertação propõe uma adaptação no método *Vector Fitting* tradicional no domínio do tempo considerando um sinal de entrada. Esta adaptação nesse método foi proposta, visto que até o presente momento ele vem sendo utilizado apenas para sinais *ringdown*. Nesta adaptação, o método VF passa a ser utilizado também para sinais ambiente e considera um sinal de entrada. Esse sinal de entrada será utilizado como um sinal *probing*.

Apresentado em Schumacher et al. 2018, o método *Vector Fitting* no Domínio do Tempo (RTD-VF), que considera uma única entrada e uma única saída (SISO), é destinado a adequar uma relação entrada-saída escalar

$$Y(s) \approx \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{s-p_i} U(s), \quad (2)$$

onde  $\{c_i\}$  e  $\{p_i\}$  são iterativamente estimados por meio de um procedimento de dois estágios que será descrito a seguir.

**Estágio de realocação de polo:** baseado em um conjunto de polos iniciais conhecidos  $\{\bar{p}_i\}$ , a seguinte aproximação

$$\underbrace{\left(1 + \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{s - \bar{p}_i}\right)}_{\sigma(s)} Y(s) \approx \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{s - \bar{p}_i} U(s) \quad (3)$$

é reescrita através da Transformada Inversa de Laplace

$$y(t) \approx \sum_{i=1}^N c_i \tilde{u}_i(t) - \sum_{i=1}^N d_i \tilde{y}_i(t) \quad (4)$$

com

$$\tilde{u}_i(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s - \bar{p}_i} U(s) \right\} \quad (5)$$

$$\tilde{y}_i(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s - \bar{p}_i} Y(s) \right\}. \quad (6)$$

A equação (4) é então resolvida como um problema linear sobredeterminado dos mínimos quadrados, para um dado conjunto de  $K$  amostras de dados entrada-saída no domínio do tempo  $\{y(kT), u(kT)\}, k = 0, \dots, K - 1$ , onde  $T$  denota o período de amostragem (ou o passo de tempo). A solução associada é apresentada na conhecida notação

$$\hat{\theta} = [\mathbf{M}^T \mathbf{M}]^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{y}, \quad (7)$$

onde  $\hat{\theta}$  denota a estimativa dos mínimos quadrados para o vetor de parâmetro

$$\theta = [c_1 \quad \dots \quad c_N \quad d_1 \quad \dots \quad d_N]^T \quad (8)$$

enquanto

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}^T(0) \\ \vdots \\ \mathbf{m}^T((K-1)T) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y(0) \\ \vdots \\ y((K-1)T) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

com

$$\mathbf{m}^T(kT) = [u(kT) \quad \tilde{u}_1(kT) \quad \dots \quad \tilde{u}_N(kT) \quad -\tilde{y}_1(kT) \quad \dots \quad -\tilde{y}_N(kT)]. \quad (10)$$

Os zeros da então chamada função auxiliar  $\sigma(s)$  (ver equação 3) são tomados como uma estimativa refinada para os polos  $\{p_i\}$  em (2), e podem, portanto, ser considerados como valores iniciais para os polos na próxima iteração. Esse procedimento pode ser iterado até que um conjunto de polos convergentes sejam encontrados (se  $N$  é pequeno, o algoritmo geralmente converge com menos de 5 iterações). Observa-se que os zeros de  $\sigma(s)$  podem ser facilmente obtidos calculando os autovalores da matriz  $(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C})$ , com  $(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D})$  sendo a diagonal de realização em espaço de estados para  $\sigma(s)$ :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \bar{p}_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \bar{p}_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \bar{p}_N \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{C} = [d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_N] \quad \mathbf{D} = 1. \quad (12)$$

Como uma prática usual em implementações do método *Vector Fitting*, a estabilidade do modelo é assegurada pela inversão do sinal dos polos com partes reais positivas (se eles ocorrerem enquanto for adotado  $\{\bar{p}_i\} \leftarrow \text{eig}(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C})$ ).

A fim de construir a matriz  $\mathbf{M}$  em (7), não é possível resolver as equações (5) e (6) analiticamente, uma vez que  $y(t)$  e  $u(t)$  são conhecidos somente em instantes discretos de tempo. Alternativamente, implementações do método *Vector Fitting* padrão lidam com esse problema aproximando sequências  $\{\tilde{y}_i(kT)\}$  e  $\{\tilde{u}_i(kT)\}$  a partir de técnicas numéricas de integração.

**Estágio de identificação de resíduos:** uma vez que os polos  $\{\bar{p}_i\}$  foram apurados, uma estimativa mais precisa para os resíduos  $\{c_i\}$  pode ser obtida resolvendo o problema original (2) através do método linear dos mínimos quadrados, com  $p_i = \bar{p}_i$ .

O procedimento de dois estágios descrito até agora representa a técnica *Vector Fitting* no domínio do tempo. A seguir, todas as modificações necessárias propostas transformam a implementação padrão no método *Vector Fitting Ringdown* no domínio do tempo.

Como já foi discutido, implementações padrão do método TD-VF aproximam sequências  $\{\tilde{y}_i(kT)\}$  e  $\{\tilde{u}_i(kT)\}$  usando técnicas numéricas de integração. Aqui, porém, é proposto um sistema de discretização em espaço de estados que pode ser utilizada, alternativamente, para aproximar  $\{\tilde{y}_i(kT)\}$  e  $\{\tilde{u}_i(kT)\}$  para  $k = 0, \dots, K - 1$ . Uma abordagem em espaço de estados é mais adequada para modelar respostas de transitórios de modo que pode ser utilizada uma entrada  $u(t)$  para gerar a resposta do transitório.

Baseado nas definições em (6) e (11), todos os sinais de saída  $\{\tilde{y}_i(t)\}$  e  $\{\tilde{u}_i(t)\}$  podem ser combinados em equações de estado

$$\frac{d}{dt} \tilde{y}(t) = \mathbf{A}\tilde{y}(t) + \mathbf{B}y(t), \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \tilde{u}(t) = \mathbf{A}\tilde{u}(t) + \mathbf{B}u(t), \quad (14)$$

onde  $\tilde{y}(t) = [\tilde{y}_1(1) \quad \dots \quad \tilde{y}_N(t)]^T$  e  $\tilde{u}(t) = [\tilde{u}_1(1) \quad \dots \quad \tilde{u}_N(t)]^T$ .

Se a escolha de  $T$  respeita o critério de Nyquist, então  $y(t)$  não muda significativamente entre amostras adjacentes. Nesse caso, é possível aproximar (13) e (14) por suas versões constantes por partes em tempo discreto.

$$\tilde{\mathbf{y}}[k] \approx \mathbf{A}_d \tilde{\mathbf{y}}[k] + \mathbf{B}_d \mathbf{y}[k-1], \quad \tilde{\mathbf{y}}[0] = 0 \quad (15)$$

$$\tilde{\mathbf{u}}[k] \approx \mathbf{A}_d \tilde{\mathbf{u}}[k] + \mathbf{B}_d \mathbf{u}[k-1], \quad \tilde{\mathbf{u}}[0] = 0 \quad (16)$$

onde  $y[k] = y(kT)$ ,  $\tilde{\mathbf{y}}[k] = \tilde{\mathbf{y}}(kT)$  e  $u[k] = u(kT)$ ,  $\tilde{\mathbf{u}}[k] = \tilde{\mathbf{u}}(kT)$ ,

$$\mathbf{A}_d = e^{AT} \quad \text{e} \quad \mathbf{B}_d = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{A}_d - \mathbf{I})\mathbf{B}, \quad (17)$$

onde  $\mathbf{I}$  expressa a matriz identidade  $N \times N$ .

A discretização em espaço de estados em (15) fornece um caminho fácil para simular  $\tilde{\mathbf{y}}[k]$  para  $k = 1, \dots, K-1$ . Nesse contexto, as matrizes  $\mathbf{A}_d$  e  $\mathbf{B}_d$  podem ser calculadas através da equação 17, conhecendo as matrizes  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  em (11), o que intrinsecamente define o modelo correspondente de frações parciais  $\frac{1}{s-\bar{p}_i}$ ,  $i = 1, \dots, N$  devido a conhecida relação de espaço-estado:

$$(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} = \left[ \frac{1}{s-\bar{p}_1} \quad \dots \quad \frac{1}{s-\bar{p}_N} \right]^T. \quad (18)$$

Porém, utilizando a discretização de espaço-estado também é possível garantir que as funções parciais de resíduos  $c_i$  e  $c_{i+1}$  sejam estimadas em pares conjugados perfeitos ( $c_{i+1} = c_i^*$ ) sempre que  $\bar{p}_{i+1} = \bar{p}_i^*$ . Como evidenciado na equação (19), se  $\bar{p}_i$  e  $\bar{p}_{i+1}$  constituem um par complexo conjugado, então a correspondente fração parcial básica  $\frac{1}{s-\bar{p}_i}$  e  $\frac{1}{s-\bar{p}_i^*}$  podem ser substituídas por  $\left(\frac{1}{s-\bar{p}_i} + \frac{1}{s-\bar{p}_i^*}\right)$  e  $\left(\frac{j}{s-\bar{p}_i} - \frac{j}{s-\bar{p}_i^*}\right)$ , respectivamente. Essa modificação é implementada durante a discretização de espaço-estado simplesmente substituindo as submatrizes

$$\begin{bmatrix} \bar{p}_i & 0 \\ 0 & \bar{p}_{i+1} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

dentro das matrizes  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  em (11), por, respectivamente,

$$\begin{bmatrix} \text{Re}\{\bar{p}_i\} & \text{Imag}\{\bar{p}_i\} \\ -\text{Imag}\{\bar{p}_i\} & \text{Re}\{\bar{p}_i\} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Tal substituição pode ser considerada como uma transformação modal e também é realizada no clássico método *Vector Fitting* no domínio da frequência. Como pode ser observado na equação (9), essa substituição tem o efeito de que os resíduos correspondentes no vetor de solução  $\theta$  tornam-se iguais a  $\text{Re}(c_1)$  e  $\text{Im}(c_1)$ .

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{s-\bar{p}_i} & \frac{1}{s-\bar{p}_i^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_i \\ c_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s-\bar{p}_i} + \frac{1}{s-\bar{p}_i^*} & \frac{j}{s-\bar{p}_i} - \frac{j}{s-\bar{p}_i^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Re}(c_i) \\ \text{Im}(c_i) \end{bmatrix} \quad (19)$$



O método *Vector Fitting* no domínio do tempo, assim como no domínio da frequência, é um método iterativo. A cada iteração, os coeficientes  $d_i$ ,  $h_{dc}$  e  $c_i$  vão ser recalculados, usando os polos  $\bar{p}_i$ , que foram calculados na iteração anterior.

Dessa forma, são seguidos os seguintes passos na execução desse método:

- 1) É escolhida uma estimativa inicial para os polos que vão ser utilizados para inicializar o método *Vector Fitting* no domínio do tempo;
- 2) Na primeira iteração, estimam-se os coeficientes  $d_i$ 's e  $c_i$ 's que compõem o vetor  $\theta$  e, para isso, utiliza-se a solução do método dos mínimos quadrados linear, que pode ser implementada no *Matlab* utilizando a barra invertida, através da fórmula  $\theta = M \backslash y$ .
- 3) Após calcular os coeficientes, utiliza-se os valores obtidos para  $d_i$ 's para calcular um novo conjunto de polos para a iteração atual;
- 4) Em seguida, inicia-se uma nova iteração. E retorna-se para passo 2 para calcular os coeficientes, determinam-se novos polos no passo 3 e segue para uma nova iteração até que o algoritmo convirja.

## 4.2 MÉTODO N4SID

Durantes as duas últimas décadas foram amplamente estudados métodos baseados em subespaços para abordar o problema de identificação de sistemas MIMO lineares e invariantes no tempo (Katayama, 2005), sendo que o método N4SID é um dos mais representativos.

### 4.2.1 Fundamentos Teóricos

Esta seção provê os fundamentos teóricos sobre o método de identificação por subespaço (SIM). Considerando o modelo linear, discreto e invariante no tempo, em espaço de estados, descrito por:

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k + w_k \quad (20)$$

$$y_k = C x_k + D u_k + v_k \quad (21)$$

o qual,  $A_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B_d \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{l \times n}$ ,  $D \in \mathbb{R}^{l \times m}$ . Os vetores  $u_k \in \mathbb{R}^m$  e  $y_k \in \mathbb{R}^l$  são as medidas no intervalo de tempo discreto  $k$ , das respectivas  $m$  entradas e  $l$  saídas do sistema. O vetor  $x_k \in \mathbb{R}^n$  é o vetor de espaço de estados do sistema, no intervalo de tempo discreto  $k$ , e contém os valores numéricos dos  $n$  estados. Os vetores  $v_k \in \mathbb{R}^l$  e  $w_k \in \mathbb{R}^n$  são vetores de sinais não medidos e denominados de ruído de medição e de ruído do sistema, respectivamente, assumindo que esses ruídos sejam brancos, estacionários e com média zero (Van Overschee e De Moor, 1994).

O par de matrizes  $\{A_d, C\}$  é assumido ser observável, implicando que todos os modos no sistema podem ser observados na saída  $y_k$ . O par de matrizes  $\{A_d, B_d\}$ , é assumido ser controlável, implicando que todos os modos do sistema são excitados pela entrada determinística  $u_k$ , e/ou pela entrada estocástica  $w_k$ .

A ideia básica dos algoritmos de subespaços é estimar as matrizes  $A_d, B_d, C, D$  de um modelo de espaço de estados discreto determinístico-estocástico (Eqs. 20-21), dado que seja disponibilizado o conjunto de dados de entrada e de saída de um sistema dinâmico.

Os métodos de identificação por subespaços consistem em duas etapas. Na primeira etapa, o algoritmo calcula uma determinada característica do subespaço de um conjunto de dados de entrada e de saída, o qual coincide com o subespaço gerado pelas colunas da matriz de observabilidade estendida ( $\Gamma_i$ ). A dimensão deste subespaço é igual à ordem do sistema a ser identificado.

Na segunda etapa, o algoritmo de identificação por subespaços N4SID usa a matriz de observabilidade estendida para, implicitamente, determinar duas sequências de estado. A partir das sequências de estado, combinadas com os dados originais de entrada e de saída, todas as matrizes do sistema podem ser determinadas diretamente pela resolução de um conjunto de equações pelo método dos mínimos quadrados.

Antes da identificação das matrizes do sistema, para o cálculo da sequência de vetor de estados utiliza-se apenas os dados de entrada e de saída. No procedimento de identificação, o principal passo é calcular a decomposição em valores singulares (SVD) de uma matriz de um bloco de Hankel, construída a partir dos dados de entrada e de saída (Van Overschee & De Moor, 1994; Katayama, 2005).

#### 4.2.2 Identificação por Subespaços

O problema de identificação requer que, por meio de dados de entrada-saída, aplicados a um sistema dinâmico, encontrem-se as matrizes  $A_d, B_d, C, D$ , de um modelo de espaço de estados discreto determinístico.

As Eqs. 20-21 podem ser rearranjadas e, após algumas manipulações algébricas, fica estabelecido que (Van Overschee & De Moor, 1994; Katayama, 2005):

$$Y_p = \Gamma_i X_p^d + H_i^d U_p \quad (22)$$

$$Y_f = \Gamma_i X_f^d + H_i^d U_f \quad (23)$$

$$X_f^d = A^i X_p^d + \Delta_i^d U_p \quad (24)$$

os quais:  $Y_p$  e  $Y_f$  são vetores de saídas passadas e futuras, respectivamente;  $U_p$  e  $U_f$  são vetores de entradas passadas e futuras, respectivamente. Estes vetores formam o bloco de Hankel de entrada ( $U_p$  e  $U_f$ ) e de saída ( $Y_p$  e  $Y_f$ ). O índice  $d$  indica o uso

de técnicas de subespaço para sistemas determinísticos, e o índice  $i$  denota o número de blocos linha (para  $\Gamma_i$ ) e coluna (para  $\Delta_i^d$ ), maiores que a ordem  $n$  do sistema.

As equações de saídas (22) e (23), são definidas como uma combinação linear de estados passados e futuros, multiplicados pela matriz de observabilidade estendida  $\Gamma_i$ , e a combinação linear das entradas passadas e futuras, multiplicadas por sua resposta ao impulso  $H_i^d$ , também denominada matriz Toeplitz. A Eq. 24 relaciona os estados futuros ( $X_f^d$ ) com os estados passados ( $X_p^d$ ), sob a influência das entradas, o qual  $\Delta_i^d$  é a inversa da matriz de controlabilidade (Van Overschee & De Moor, 1994).

#### 4.2.3 Estimando os Subespaços

Para que os subespaços da matriz de observabilidade estendida  $\Gamma_i$  e da sequência de estados da matriz  $X_f^d$  sejam estimados, por meio dos dados de entrada-saída, é necessária a determinação da ordem  $n$  do sistema. A estimação  $\Gamma_i X_f^d$  (Eq. 23) pode ser obtida por meio da projeção oblíqua de dados de entrada-saída do sistema, através de:

$$O_i = \Gamma_i X_f^d \quad (25)$$

Para que a projeção oblíqua  $O_i$  seja separada em  $\Gamma_i$  e em  $X_f^d$ , para sistemas puramente determinísticos, o posto de  $O_i$  deverá ser igual à ordem  $n$  do sistema e,  $\Gamma_i$  e  $X_f^d$  podem ser recuperados de forma precisa pela decomposição SVD (Van Overschee & De Moor, 1994; Katayama, 2005; Qin, 2006):

$$O_i = U_1 S_1 V_1^T = (U_1 \quad U_2) \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix} \quad (26)$$

os quais,  $S_1$  é uma submatriz de  $S$  contendo os valores singulares não-nulos de  $O_i$  e,  $U_1$  e  $V_1^T$  são as partes correspondentes de  $U$  e  $V^T$ . A ordem  $n$  do sistema das Eqs. 20-21 é igual ao número de valores singulares da Eq. 26, diferentes de zero.

A matriz de observabilidade estendida  $\Gamma_i$  compartilha o mesmo espaço coluna da projeção oblíqua  $O_i$ , fazendo com que possa ser obtida por:

$$\Gamma_i = U_1 S_1^{1/2} \quad (27)$$

Como a sequência de estado  $X_f^d$  fica no espaço linha da projeção oblíqua  $O_i$ , esta sequência pode ser obtida através de:

$$X_f^d = S_1^{1/2} V_1^T \quad (28)$$

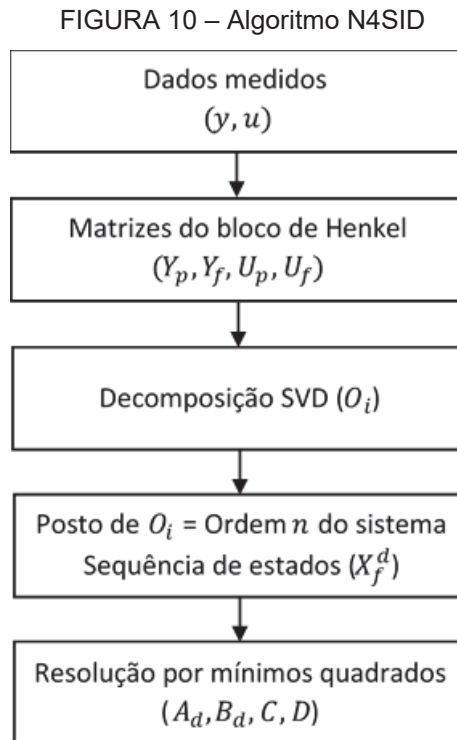
#### 4.2.4 Estimação das matrizes do sistema

Sendo a projeção oblíqua  $O_i$ , obtida pela decomposição SVD (Eq. 26) e particionada nos subespaços coluna ( $\Gamma_i$ ) ou linha ( $X_f^d$ ), as matrizes do sistema podem ser estimadas a partir de qualquer dos dois subespaços indicados (Eqs. 27-28).

No método N4SID, as matrizes do sistema  $A_d, B_d, C, D$  são estimadas em único passo, resolvendo o problema apresentado na Eq. 29, através dos mínimos quadrados (Van Overschee & De Moor, 1994; Katayama, 2005; Qin, 2006).

$$\begin{pmatrix} X_{i+1}^d \\ Y_{i|i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_d & B_d \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i^d \\ U_{i|i} \end{pmatrix} \quad (29)$$

Um fluxograma do algoritmo N4SID é ilustrado na Figura 10.



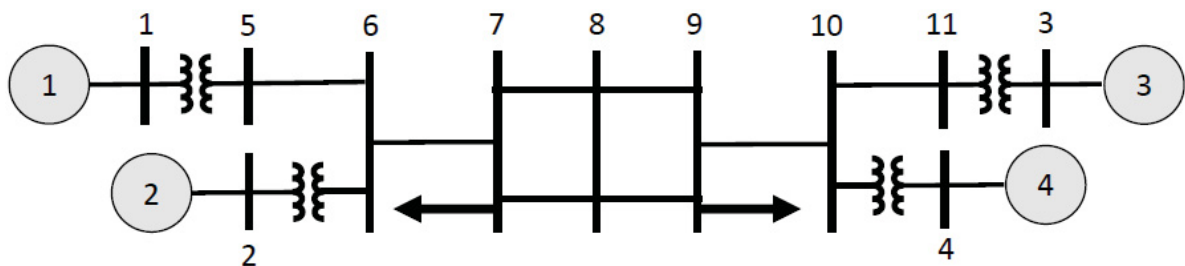
## 5 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS N4SID E VF

Neste capítulo os métodos N4SID e *Vector Fitting* descritos no capítulo 4 serão aplicados de forma a se verificar dois aspectos. O primeiro aspecto consiste em observar se o método *Vector Fitting* é capaz de estimar modos eletromecânicos de forma satisfatória, utilizando dados ambiente e considerando um sinal de entrada. O segundo aspecto consiste em observar se a utilização de um sinal teste torna a estimação de modos eletromecânicos mais precisa. Para essa finalidade o método N4SID será simulado com e sem o sinal de entrada (sinal teste), e os resultados dessas simulações serão comparados. Os resultados obtidos através do método N4SID também serão comparados com os resultados obtidos pelo método *Vector Fitting*. Nas simulações desse capítulo será utilizado um sistema teste composto por 11 barras e um sistema teste composto por 39 barras.

### 5.1 SISTEMA KUNDUR DE 11 BARRAS

Para validar a utilização dos métodos N4SID e VF empregando um sinal teste e dados ambiente, foram realizadas simulações considerando um sistema elétrico multi-máquinas. Esse sistema, apresentado em (Kundur, 1994), é composto por 11 barras e possui 4 geradores, conforme mostra a figura 11. Para esse sistema são conhecidos dados de frequência, tensão e potência ativa. Os dados ambiente utilizados nas simulações são conhecidos e simulam dados obtidos através de PMUs.

FIGURA 11 – Sistema de 11 barras com 4 turbinas térmicas



FONTE: Kundur (1994).

As simulações computacionais utilizando dados ambiente do sistema teste foram realizadas com o auxílio dos programas ANATEM, ANAREDE e Pacdyn, desenvolvidos pelo CEPEL, sendo considerado como sinal teste uma variação aleatória da carga de uma das barras do sistema. Essa variação aleatória busca representar o típico comportamento aleatório de variação das cargas de uma rede elétrica quando esta opera sob condições de regime quase-permanente (resposta ambiente do sistema).

Primeiramente, foram realizadas simulações no programa ANATEM, utilizando a solução de fluxo de potência gerada pelo *software* ANAREDE como condição inicial de operação do sistema. No ANATEM, a potência ativa da carga em uma das barras do sistema foi variada aleatoriamente entre 0 e 5% em relação ao seu valor nominal. Primeiramente foi variada apenas a potência ativa da barra 7 e, posteriormente, somente a potência ativa da barra 9. Nessas simulações foi verificado o efeito da variação de potência ativa na frequência e na tensão das barras 7 e 9. Cumpre ainda destacar que nas simulações foi utilizada uma taxa de amostragem de 0,01 segundo, totalizando 60.000 medições (amostras) em cada simulação (ou, equivalentemente, um intervalo de tempo de 10 min). Para evitar distorções na estimação de modos eletromecânicos devido aos transitórios iniciais da simulação, foram desconsideradas as primeiras 1000 medições (amostras).

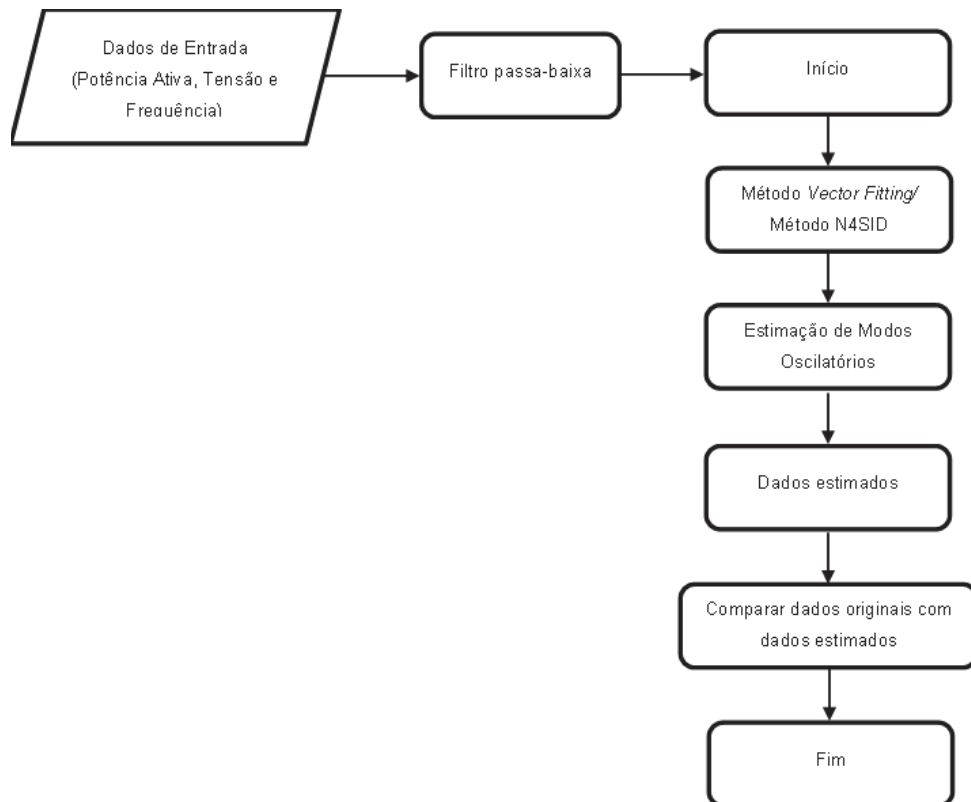
Antes da aplicação dos métodos em si, o sinal foi pré-processado através da aplicação de um filtro. O filtro visa minimizar o efeito do ruído na estimação dos modos eletromecânicos. Especificamente, o filtro foi projetado a fim de eliminar as componentes do sinal que estão fora do intervalo de frequências desejado (0,2 a 8 Hz). O filtro implementado no Matlab é um filtro digital do tipo *Butterworth*, passa-faixa, de quarta ordem, com frequência de corte de 0,2 a 8 Hz. Após a filtragem, também foi realizada a re-amostragem do sinal, adotando uma frequência de amostragem desejada de 5 Hz. Dessa forma, o número total de amostras na janela é reduzido de 60.000 para 3.000.

Para esse estudo, foi programado um algoritmo do método VF foi implementado em Matlab, utilizando ordem do modelo igual a 6, seguindo diretrizes estabelecidas por trabalhos anteriores (Schumacher et al., 2018 e Schumacher et al., 2019). Inicialmente, nesse algoritmo, como entrada foi utilizada a variação de potência ativa em uma determinada barra do sistema e, como saída, foi observada a frequência e a tensão na mesma barra.

Para analisar o desempenho do método VF, também foram feitas simulações com o método N4SID. Esse método foi utilizado com o intuito de comparar os resultados obtidos através do método VF e também comparar os resultados obtidos através do método N4SID com o uso de um sinal teste e sem o uso do sinal teste. Nas simulações do método N4SID foram utilizadas ordens do modelo iguais a  $N = 15$ ,  $N = 20$ ,  $N = 25$  e  $N = 30$ .

No fluxograma apresentado na Figura 12, é possível observar os passos que foram seguidos para obtenção dos resultados.

FIGURA 12 – Fluxograma do Algoritmo de Estimação de Modos Oscilatórios



FONTE: A autora (2022).

Para verificar o desempenho dos métodos VF e N4SID e a utilização de sinais de teste, foram simulados quatro cenários, conforme descrito na tabela 1. Nestes cenários foi observado o efeito da variação da potência ativa na frequência e tensão das barras do sistema. Essas simulações foram realizadas para dois casos distintos: um caso em que o sistema se encontra mais carregado, e outro caso em que o sistema se encontra menos carregado.



TABELA 1 – Cenários simulados no Matlab utilizando o sistema Kundur de 11 barras

	Métodos utilizados	Nível de carga	Entrada: Variação de Potência Ativa (barra)	Saída: frequência e tensão (barra)
<b>Cenário 1</b>	N4SID e <i>Vector Fitting</i>	Mais carregado	7	7
<b>Cenário 2</b>	N4SID e <i>Vector Fitting</i>	Mais carregado	9	9
<b>Cenário 3</b>	N4SID e <i>Vector Fitting</i>	Menos carregado	7	7
<b>Cenário 4</b>	N4SID e <i>Vector Fitting</i>	Menos carregado	9	9

FONTE: a autora (2022).

Nos cenários descritos da tabela 1 foram selecionadas as barras 7 e 9 para a realização das simulações, visto que são as barras do sistema que apresentam carga.

Através das simulações foi possível estimar os polos eletromecânicos do sistema e foi calculado o fator de amortecimento do modo dominante estimado (em %) através da equação

$$\xi = -\frac{\text{Re}(s)}{|s|} \times 100\% \quad (30)$$

onde  $s$  é o polo dominante do sistema. O fator de amortecimento é calculado com o intuito de validar o desempenho dos métodos considerados. O polo dominante do sistema foi identificado por critério de semelhança com relação ao polo dominante estimado pelo *software* Pacdyn, que realiza uma linearização das equações dinâmicas do sistema em torno do seu ponto de operação (fornecido pelo ANAREDE).

### 5.1.1 Sistema mais carregado

Nas simulações dos Cenários 1 e 2, que analisam um sistema mais carregado, indicados na tabela 1, foi considerado um nível mais elevado de carga, com a seguinte configuração:

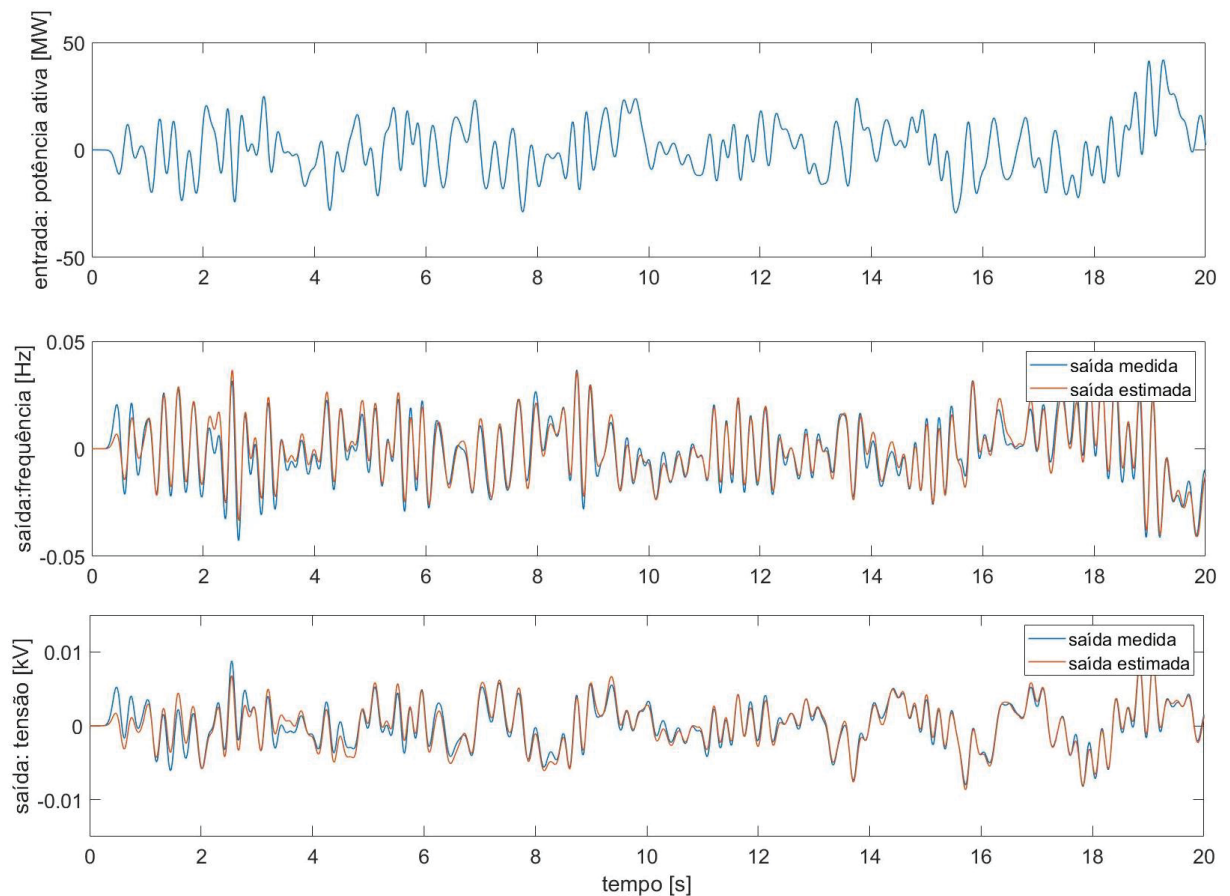
$$P_{barra\ 7} = 1111MW, Q_{barra\ 7} = 115\ MVar, P_{barra\ 9} = 1608MW, Q_{barra\ 9} = 440\ MVar.$$

### 5.1.1.1 Cenário 1

Considerando o sistema multi-máquinas indicado na figura 7, e um nível mais elevado de carga, foi variada a potência ativa da barra 7 do sistema no *software* ANATEM e foram coletados os sinais de frequência e tensão na barra 7.

Depois de realizar a filtragem e re-amostragem nos dados coletados, os dados de potência ativa foram utilizados como dados de entrada no algoritmo do método *Vector Fitting* programado no Matlab, com o intuito de verificar se esse método seria eficaz em estimar os dados de frequência e tensão. Na figura 13 é apresentada a entrada (potência ativa) e como saída a frequência e tensão, comparando a saída estimada com a medida. Nessa figura é apresentada apenas uma janela dos resultados obtidos para uma melhor visualização.

FIGURA 13 – Entrada medida e Saídas Medidas e Estimadas – Cenário 1



FONTE: A autora (2022).

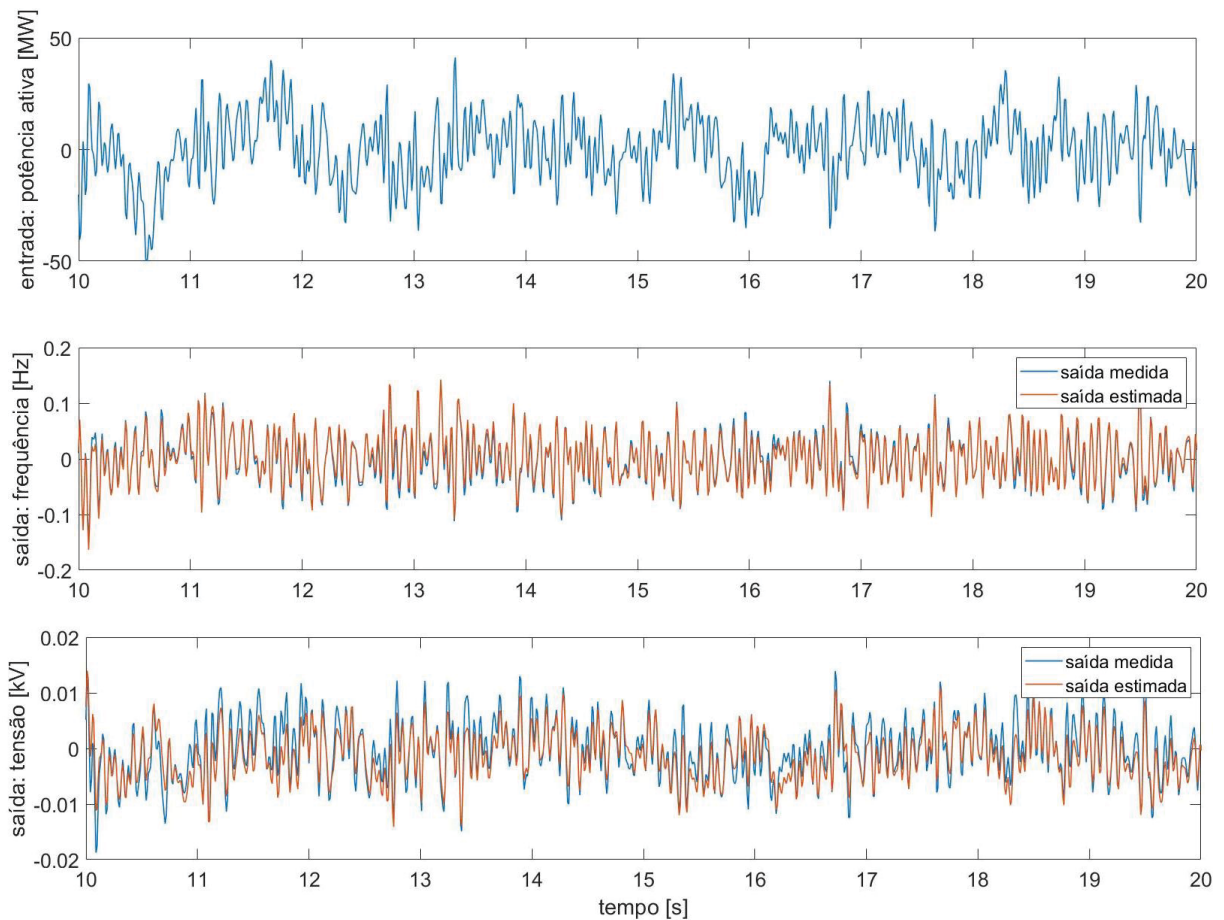
Para verificar a acurácia entre a saída medida e a saída estimada, foi calculado o MSE (*Mean Squared Error*). Para a saída estimada referente a frequência foi obtido o valor MSE de  $1,4048 \times 10^{-5}$ . Já para a saída estimada referente a tensão foi obtido o valor MSE de  $1,5214 \times 10^{-7}$ .

#### 5.1.1.2 Cenário 2

Neste cenário foi variada a potência ativa da barra 9 e foram coletados os respectivos sinais de frequência e tensão na barra 9.

Depois de realizar a filtragem e re-amostragem nos dados coletados, os dados de potência ativa foram utilizados como dados de entrada do método *Vector Fitting*, com o intuito de verificar se esse método seria eficaz em estimar os dados de frequência e tensão. Na figura 14 é apresentada a entrada (potência ativa) e como saída a frequência e tensão, comparando a saída estimada com a medida. Nessa figura é apresentada apenas uma janela dos resultados obtidos para uma melhor visualização.

FIGURA 14 – Entrada medida e Saídas Medidas e Estimadas – Cenário 2



FONTE: A autora (2022).

Para verificar a acurácia entre a saída medida e a saída estimada, foi calculado o MSE (*Mean Squared Error*). Para a saída estimada referente a frequência foi obtido o valor MSE de  $3,7426 \times 10^{-5}$ . Já para a saída estimada referente a tensão foi obtido o valor MSE de  $6,9211 \times 10^{-6}$ .

### 5.1.1.3 Avaliação comparativa dos resultados obtidos – sistema mais carregado

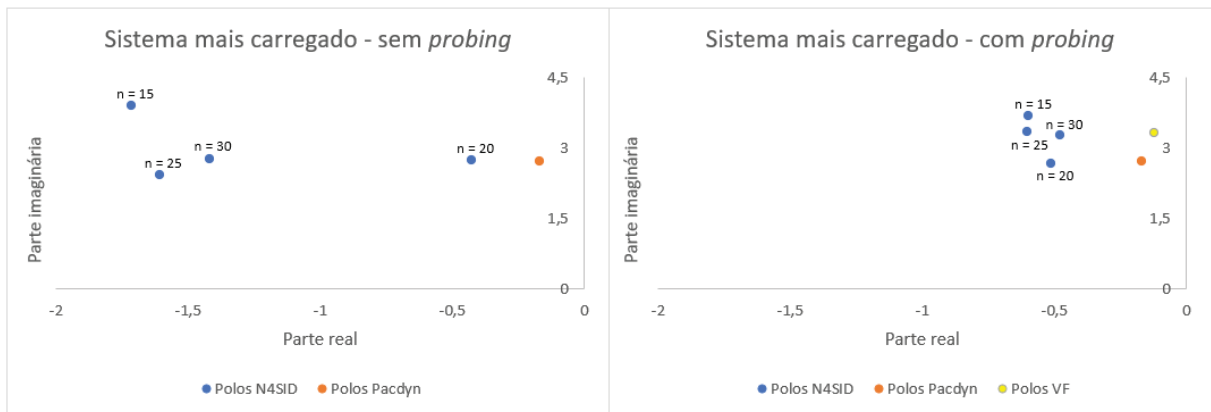
Para validar o resultado obtido através do método VF para o sistema mais carregado, o método N4SID do Matlab foi utilizado. Inicialmente, foram realizadas simulações utilizando o método N4SID sem considerar o sinal teste. Para essas simulações, além de o sinal ser filtrado e da re-amostragem, também foi removida a média do sinal.

Em seguida, foram realizadas simulações considerando o sinal *probing* (sinal de teste). Para essas simulações, não foi removida a média do sinal, a fim de evitar possíveis imprecisões nas estimativas oriundas da remoção da média do sinal de entrada. Em ambas as simulações, foram utilizadas as ordens do modelo do método N4SID igual a 15, 20, 25 e 30 tanto para o sistema mais carregado, quanto para o sistema menos carregado.

O método *Vector Fitting* foi simulado apenas com ordem  $N = 6$  enquanto o método N4SID foi simulado para as ordens  $N = 15$ ,  $N = 20$ ,  $N = 25$  e  $N = 30$  devido à natureza dos métodos. Isso ocorreu porque o Método N4SID é geralmente aplicado com uma ordem maior ( $>15$ ). Já o método VF apresenta resultados melhores mesmo utilizando ordens menores.

Nas simulações do Método N4SID para o sistema mais carregado, foram obtidos os polos eletromecânicos exibidos na figura 15. Neste gráfico, também são apresentados os polos obtidos através do método VF e do *software* Pacdyn.

FIGURA 15 – Polos eletromecânicos obtidos nas simulações do Método N4SID – sistema mais carregado



FONTE: A autora (2022).

Na figura 15 é possível observar que, em geral, as simulações realizadas considerando o sinal teste apresentaram polos estimados mais próximos aos polos gerados através do *software* PacDyn (tidos aqui como referência). Ainda nesse contexto, comparando-se as estimativas obtidas via *Vector Fitting* e N4SID, observa-se que o método *Vector Fitting* foi capaz de gerar uma estimativa ligeiramente mais próxima daquela obtida via PacDyn.

Nas simulações que não consideraram o sinal teste, os polos estimados que apresentaram mais proximidade com os polos gerados através do *software* PacDyn foram obtidos na simulação do método N4SID de ordem  $N = 20$ . Já os polos obtidos nas simulações do método N4SID de ordem  $N = 15$ ,  $N = 25$  e  $N = 30$  ficaram mais distantes.

Na tabela 2 encontram-se sumarizados os polos obtidos via PacDyn, *Vector Fitting* e N4SID. O fator de amortecimento desses polos, calculado através de (30), também é apresentado nessa tabela. Por meio dos resultados apresentados é possível novamente confirmar que os polos eletromecânicos obtidos a partir das simulações do método *Vector Fitting* demonstraram estar relativamente mais próximos dos polos obtidos através do programa Pacdyn (também em termos da sua taxa de amortecimento), quando comparados com aqueles obtidos com o método N4SID.

TABELA 2 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento para o sistema mais carregado

Sistema mais carregado	Polos Eletromecânicos	Fator de Amortecimento
PacDyn	$-0,1674 \pm 2,7099i$	$\xi = 6,1656 \%$
Método <i>Vector Fitting</i>	$-0,1212 \pm 3,3296i$	$\xi = 3,6377 \%$
Método N4SID (sem <i>probing</i> )	$-1,7148 \pm 3,9088i$ (ordem n=15)	$\xi = 40,1743 \%$
	$-0,4269 \pm 2,7481i$ (ordem n=20)	$\xi = 15,3503 \%$
	$-1,6049 \pm 2,4347i$ (ordem n=25)	$\xi = 55,0364 \%$
	$-1,4180 \pm 2,7749i$ (ordem n=30)	$\xi = 45,5039 \%$
Método N4SID (com <i>probing</i> )	$-0,5963 \pm 3,6855i$ (ordem n=15)	$\xi = 15,9719 \%$
	$-0,5119 \pm 2,6678i$ (ordem n=20)	$\xi = 18,8443 \%$
	$-0,6035 \pm 3,3399i$ (ordem n=25)	$\xi = 17,7815 \%$
	$-0,4781 \pm 3,2617i$ (ordem n=30)	$\xi = 14,5030 \%$

FONTE: A autora (2022).

Quando comparada à aplicação do método N4SID sem sinal teste, a estimativa realizada via método VF, que utiliza sinal de teste (*probing*), apresentou maior capacidade de gerar estimativas mais próximas àquelas obtidas via PacDyn, não só em relação à parte real dos polos, mas também em relação à taxa de amortecimento. Já quando se analisa a aplicação do método N4SID com *probing*, comparando-a com o desempenho do método VF, percebe-se que ainda assim o método VF apresenta melhor desempenho, tanto em relação à proximidade dos polos obtidos, quanto em relação à taxa de amortecimento. Isto pode ser observado através dos dados apresentados na tabela 2.

### 5.1.2 Sistema menos carregado

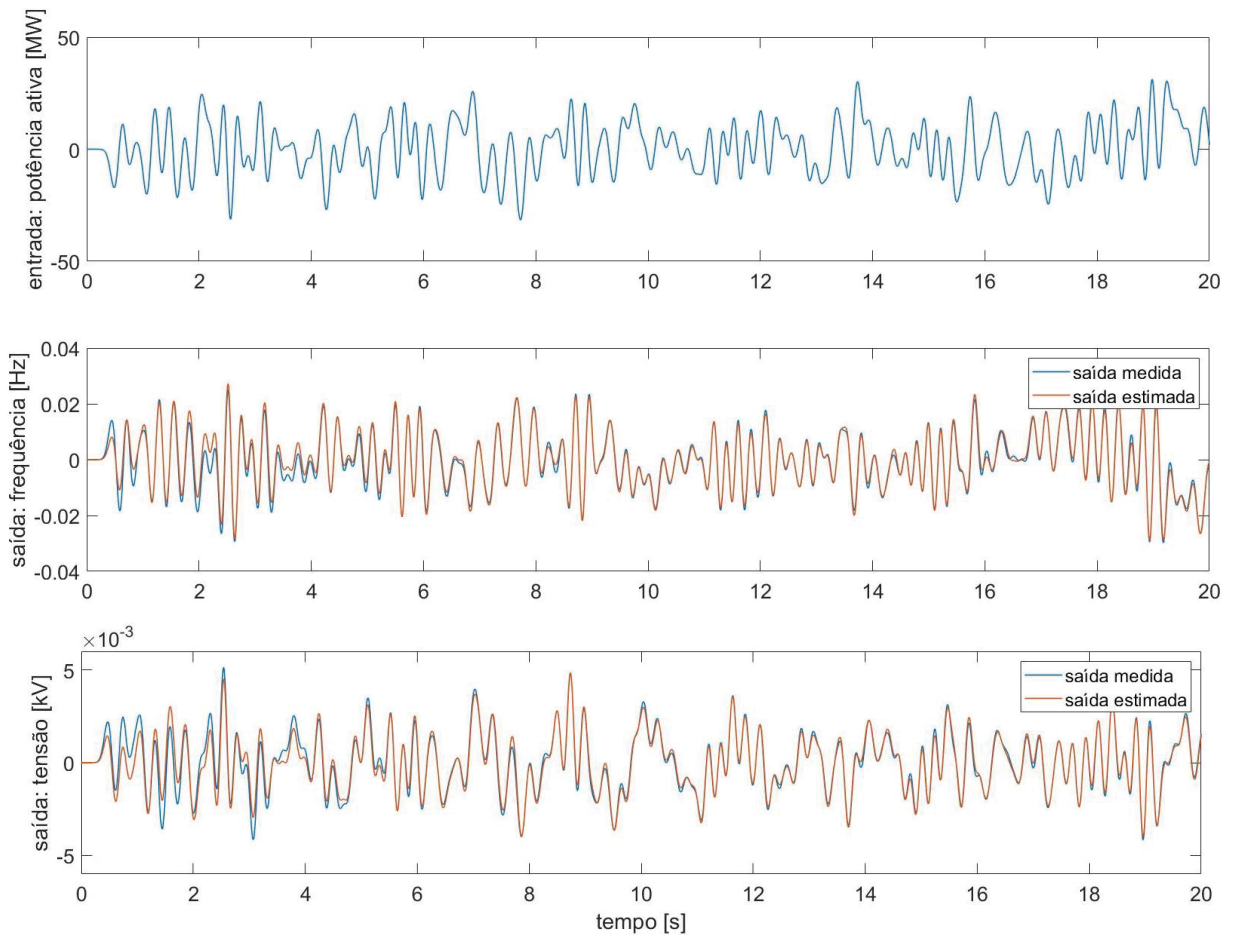
Nas simulações dos Cenários 3 e 4, que analisam um sistema menos carregado, indicados na tabela 1, foi considerado um nível inferior de carga, com a seguinte configuração:  $P_{barra\ 7} = 967MW$ ,  $Q_{barra\ 7} = 100\ MVar$ ,  $P_{barra\ 9} = 1200MW$ ,  $Q_{barra\ 9} = 100\ MVar$ .

#### 5.1.2.1 Cenário 3

Nesse caso, foram seguidos os mesmos passos do cenário 1 apresentado na seção 5.1.1.1, diferenciando-se apenas pelo fato de as simulações realizadas no *software* Anatem considerarem um nível inferior de carga.

Na figura 16 é apresentada a entrada (potência ativa) e como saída a frequência e tensão, comparando a saída estimada com a medida. Nessa figura é apresentada apenas uma janela dos resultados obtidos para uma melhor visualização.

FIGURA 16 – Entrada medida e Saídas Medidas e Estimadas – Cenário 3



FONTE: A autora (2022).

Para verificar a acurácia entre a saída medida e a saída estimada, foi calculado o MSE (*Mean Squared Error*). Para a saída estimada referente a frequência foi obtido o valor MSE de  $9,0987 \times 10^{-7}$ . Já para a saída estimada referente a tensão foi obtido o valor MSE de  $4,1499 \times 10^{-8}$ .

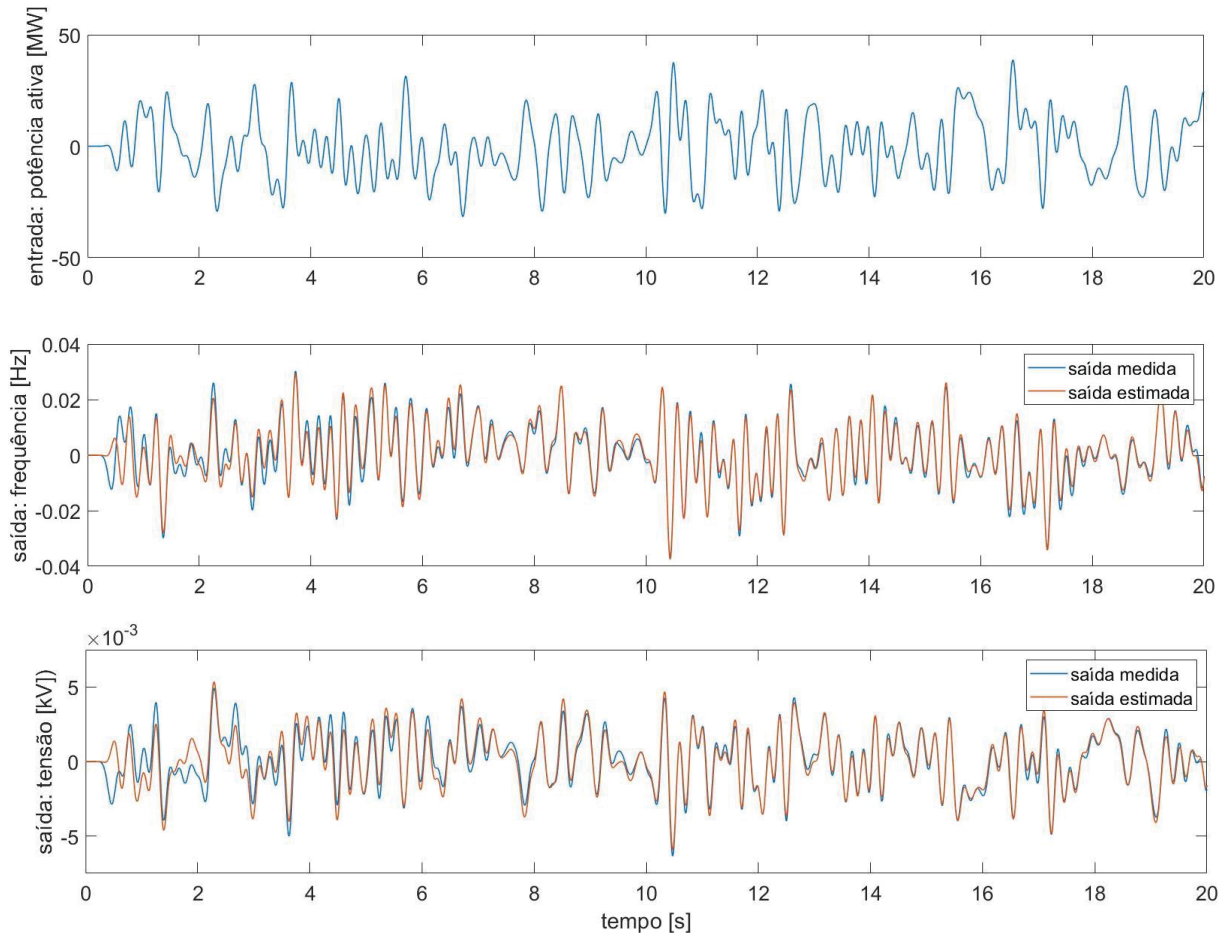
#### 5.1.2.2 Cenário 4

Nesse item, foram seguidos os mesmos passos do cenário 2 apresentado na seção 5.1.1.2, diferenciando-se apenas pelo fato de as simulações realizadas no software Anatem considerarem um nível inferior de carga.



Na figura 17 é apresentada a entrada (potência ativa) e como saída a frequência e a tensão, comparando a saída estimada com a medida. Nessa figura é apresentada apenas uma janela dos resultados obtidos para uma melhor visualização.

FIGURA 17 – Entrada medida e Saídas Medidas e Estimadas – Cenário 4



FONTE: A autora (2022).

Para verificar a acurácia entre a saída medida e a saída estimada, foi calculado o MSE (*Mean Squared Error*). Para a saída estimada referente a frequência foi obtido o valor MSE de  $1,4929 \times 10^{-6}$ . Já para a saída estimada referente a tensão foi obtido o valor MSE de  $5,9820 \times 10^{-8}$ .

### 5.1.2.3 Avaliação comparativa dos resultados obtidos – sistema menos carregado

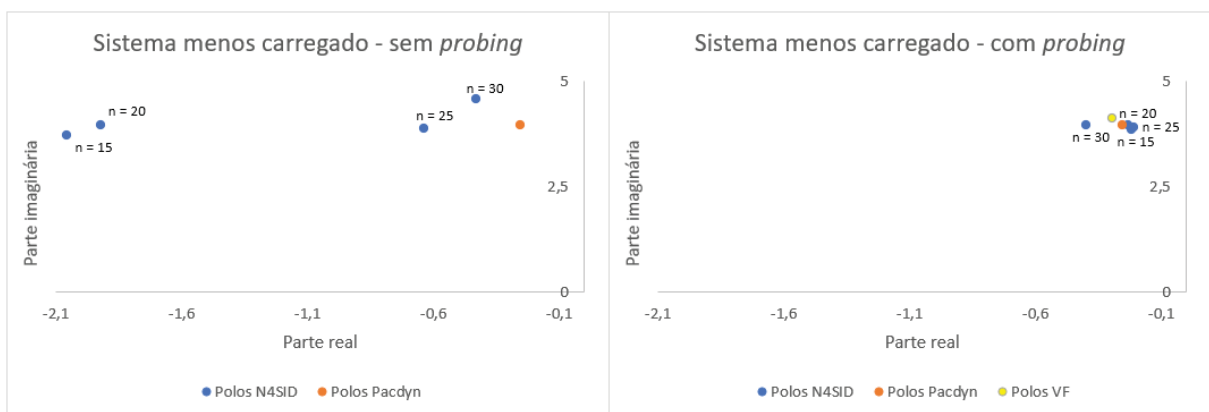
Para validar o resultado obtido através do método VF para o sistema menos carregado, um algoritmo do método N4SID foi programado em Matlab. Inicialmente, foram realizadas simulações utilizando o método N4SID sem considerar o sinal teste. Para essas simulações, além de o sinal ser filtrado e da re-amostragem, foi removida a média do sinal.

Em seguida, foram realizadas simulações considerando o sinal teste. Para essas simulações, não foi removida a média do sinal, a fim de evitar possíveis imprecisões nas estimativas oriundas da remoção da média do sinal de entrada. Em ambas as simulações, foram utilizadas as ordens do modelo do método N4SID igual a 15, 20, 25 e 30 tanto para o sistema mais carregado, como para o sistema menos carregado.

O método *Vector Fitting* foi simulado apenas com ordem  $N = 6$  enquanto o método N4SID foi simulado para as ordens  $N = 15$ ,  $N = 20$ ,  $N = 25$  e  $N = 30$  devido à natureza dos métodos. Isso ocorreu porque o Método N4SID é geralmente aplicado com uma ordem maior ( $>15$ ). Já o método VF apresenta resultados melhores mesmo utilizando ordens menores.

Nas simulações do Método N4SID para o sistema menos carregado, foram obtidos os polos eletromecânicos exibidos na figura 18. Nesta figura, também são apresentados os polos obtidos através do *software* Pacdyn.

FIGURA 18 – Polos eletromecânicos obtidos nas simulações do Método N4SID – sistema menos carregado



FONTE: A autora (2022).

Na figura 18 é possível observar que as simulações realizadas considerando o sinal *probing* apresentaram polos estimados mais próximos aos polos gerados através do *software* PacDyn. Nas simulações que não consideraram o sinal *probing*, os polos estimados que apresentaram mais proximidade com os polos gerados através do *software* PacDyn foram obtidos na simulação do método N4SID de ordem  $N=30$ , seguido pela simulação do método N4SID de ordem  $N = 25$ . Já os polos obtidos nas simulações do método N4SID de ordem  $N = 15$  e  $N = 20$  ficaram mais distantes. As simulações que consideraram o sinal *probing* apresentaram polos estimados muito mais próximos aos polos gerados através do *software* PacDyn, sendo que os polos que apresentaram maior proximidade foram obtidos através das simulações do método N4SID de ordem  $N = 15$ ,  $N = 20$  e  $N = 25$ .

Para validar os resultados obtidos nas simulações do sistema menos carregado, foram utilizados recursos no programa PacDyn que permitem a sua utilização de forma integrada com o programa ANATEM, permitindo análise da estabilidade dinâmica. Analisando os casos simulados no *software* PacDyn, foi possível obter os modos eletromecânicos dominantes do sistema que são apresentados na tabela 3. Também são apresentados os modos eletromecânicos do sistema obtidos através das simulações realizadas utilizando o método *Vector Fitting* e o método N4SID. Vários polos foram obtidos para cada um dos modelos estimados pelo método N4SID e VF, e por similaridade, ou seja, comparando as partes reais e imaginárias, foi apresentado na tabela 3 apenas o polo que mais se aproximou do polo dominante obtido pelo *software* PacDyn. O fator de amortecimento desses polos, calculado através de (30), também é apresentado nessa tabela.

TABELA 3 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento para o sistema menos carregado

Sistema menos carregado	Polos Eletromecânicos	Fator de amortecimento
PacDyn	$-0,2532 \pm 3,9628i$	$\xi = 6,3764 \%$
Método <i>Vector Fitting</i>	$-0,2941 \pm 4,1338i$	$\xi = 7,0966 \%$
Método N4SID (sem sinal teste)	$-2,0568 \pm 3,7104i$ (ordem $n=15$ )	$\xi = 48,4826 \%$
	$-1,9192 \pm 3,9652i$ (ordem $n=20$ )	$\xi = 43,5663 \%$
	$-0,6384 \pm 3,8754i$ (ordem $n=25$ )	$\xi = 16,2541 \%$
	$-0,4293 \pm 4,5714i$ (ordem $n=30$ )	$\xi = 9,3499 \%$
Método N4SID (com sinal teste)	$-0,2201 \pm 3,8472i$ (ordem $n=15$ )	$\xi = 5,7117 \%$
	$-0,2312 \pm 3,9671i$ (ordem $n=20$ )	$\xi = 5,8181 \%$
	$-0,2110 \pm 3,9146i$ (ordem $n=25$ )	$\xi = 5,3823 \%$
	$-0,3973 \pm 3,9482i$ (ordem $n=30$ )	$\xi = 10,0123 \%$

FONTE: A autora (2022).

Os polos eletromecânicos obtidos a partir das simulações do método *Vector Fitting* demonstraram estar relativamente próximos dos polos obtidos através do programa Pacdyn. Quando observados os dados do sistema obtidos através do PacDyn, o método *Vector Fitting* também apresentou uma melhor aproximação em relação à taxa de amortecimento para o sistema mais carregado, quando comparado com o método N4SID.

Quando comparada à aplicação do método N4SID sem sinal teste, a estimação realizada via método VF, que utiliza sinal de teste (*probing*) apresentou maior capacidade de gerar estimativas mais próximas àquelas obtidas via PacDyn, não só em relação à parte real dos polos, mas também em relação à taxa de amortecimento. Já quando se analisa a aplicação do método N4SID com *probing*, comparando-a com o desempenho do método VF, percebe-se que ainda assim o método VF apresenta melhor desempenho, tanto em relação à proximidade dos polos obtidos, quanto em relação à taxa de amortecimento. Isto pode ser observado através dos dados apresentados na tabela 3.

### 5.1.3 Discussão dos resultados obtidos através do Método VF e N4SID

Nas simulações dos cenários de 1 a 4 utilizando o sistema teste de 11 barras foi possível observar que, tanto para as simulações do sistema mais carregado quanto para as simulações do sistema menos carregado, a utilização do sinal teste fez com que os polos eletromecânicos estimados através das simulações se aproximassem mais dos polos do sistema gerados através do *software* PacDyn (tidos aqui como referência para fins de comparação).

Em relação aos métodos utilizados, as simulações do método *Vector Fitting* demonstraram maior capacidade de estimar polos relativamente mais próximos aos obtidos através do programa Pacdyn do que o método N4SID. Além disso, o método *Vector Fitting* também apresentou uma melhor aproximação em relação à taxa de amortecimento para o sistema mais carregado, quando comparado com o método N4SID.

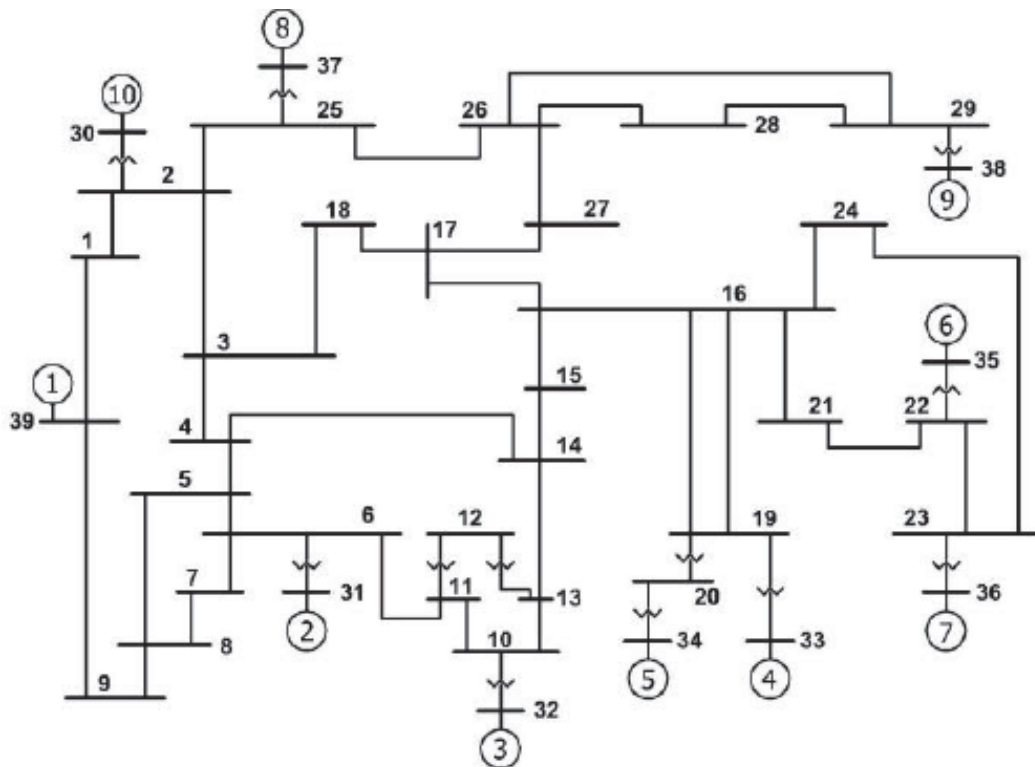
Com referência aos resultados apresentados nas tabelas 2 e 3, percebe-se que a taxa de amortecimento do sistema mais carregado está mais próxima da taxa

de amortecimento do sistema menos carregado. Nota-se que no sistema mais carregado há uma atenuação maior (mais próxima de se tornar positiva). Já no sistema menos carregado há uma atenuação menor. Também se nota que as estimativas estão mais próximas para o sistema menos carregado.

## 5.2 SISTEMA *NEW ENGLAND* DE 39 BARRAS

Para analisar a utilização dos métodos *Vector Fitting* e N4SID empregando um sinal de teste e dados ambiente, também foram realizadas simulações considerando o sistema teste IEEE 39 barras, mostrado na figura 19, que é um sistema *benchmark* do IEEE amplamente utilizado para estudos de estabilidade e controle de SEPs. Este sistema é composto de 39 barras, sendo 29 barras PQ (barras de carga) e 10 barras geradoras (sendo nove dessas barras de tensão controlada – PV e a barra de nº 39 a referência angular do sistema). O sistema possui 46 linhas de transmissão e três áreas.

FIGURA 19 – Sistema *New England* de 39 barras



FONTE: Pai (1989).

As simulações computacionais do sistema teste foram realizadas com o auxílio dos programas ANATEM, ANAREDE e PacDyn (do CEPEL), considerando o sistema operando sob condições ambiente, onde cargas desse sistema variam aleatoriamente entre 0 e 5% em relação ao seu valor nominal. Essa variação da carga seguiu uma distribuição Gaussiana durante a simulação numérica e foi considerada como sinal de teste nas simulações.

Foram realizadas simulações variando a potência ativa de algumas das barras do sistema por 1200 segundos. Para esses testes, foi observado o efeito na frequência em determinadas barras do sistema. Foi utilizada uma taxa de amostragem de 0,01 segundo, totalizando 120.000 medições em cada simulação.

A fim de pré-processar os dados de frequência, um filtro *Butterworth* de quarta ordem foi utilizado. Para este filtro, foi considerada a frequência de corte inferior e superior de 0,2 Hz e 8 Hz, respectivamente, de forma a atenuar a amplitude das frequências maiores que o limite compatível com os modos eletromecânicos geralmente observados em SEP's. Em seguida, foi realizada a re-amostragem do sinal, adotando nova resolução de 5 Hz. Dessa forma, o número total de amostras na janela é reduzido de 120.000 para 6.000. Para esse estudo, o método VF foi utilizado com uma ordem do modelo igual a 10. Nota-se que uma ordem mais elevada foi utilizada neste estudo de caso. Isso busca levar em conta o fato de que esse sistema possui maior complexidade devido ao número de barras em comparação com o sistema de 11 barras, abordado na seção 5.1.

Para comparar o desempenho do método VF, também foram feitas simulações com o método N4SID. Esse método foi utilizado com o intuito de comparar os resultados obtidos através do método VF e também comparar os resultados obtidos através do método N4SID com o uso de um sinal teste e sem o uso do sinal teste. Nas simulações do método N4SID foram utilizadas ordens do modelo iguais a 15, 20, 25 e 30.

Para verificar o desempenho dos métodos N4SID e VF e a utilização de sinais de teste, foram simulados 6 cenários, apresentados na tabela 4. O método VF apenas foi utilizado nas simulações dos cenários 1 e 2, os quais consideram um sistema SISO (apenas uma entrada e apenas uma saída). Os demais cenários são simulados utilizando apenas o método N4SID, o qual comporta sistemas MIMO (múltiplas entradas e múltiplas saídas).

TABELA 4 – Cenários simulados para o sistema de 39 barras

	Métodos utilizados	Entrada: Variação de Potência Ativa (barras)	Saída: frequência (barras)
<b>Cenário 1</b>	N4SID e <i>Vector Fitting</i>	20	31
<b>Cenário 2</b>	N4SID e <i>Vector Fitting</i>	39	39
<b>Cenário 3</b>	N4SID	20	31 e 39
<b>Cenário 4</b>	N4SID	39	31 e 39
<b>Cenário 5</b>	N4SID	20 e 39	31 e 39
<b>Cenário 6</b>	N4SID	3, 4, 8, 15, 16, 20, 24, 29, 39	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39

FONTE: a autora (2022).

Nos cenários 1 e 2, foi escolhido como sinal de entrada as potências ativas das barras de carga mais carregadas do sistema (barras 20 e 39, respectivamente). Como sinal de saída foi observada a frequência em barras geradoras próximas das respectivas barras de carga. Para o cenário 1, foi observada a frequência na barra 31 e para o cenário 2, na própria barra 39. No cenário 3, foi variada a potência ativa da barra 20 e observada a frequência nas barras 31 e 39. No cenário 4, foi variada a potência ativa da barra 39 e observada a frequência nas barras 31 e 39. No cenário 5, foram variadas as potências de ambas as barras de carga 20 e 39 e observada a frequência nas barras 31 e 39. Já no cenário 6, foram variadas as potências ativas das 9 barras mais carregadas do sistema (3, 4, 8, 15, 16, 20, 24, 29 e 39) e foi observada a frequência em todas as barras geradoras do sistema (30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 39).

Para a determinação dos cenários, foram escolhidas determinadas barras do sistema de acordo com sua localização no sistema e seu nível de carga. O carregamento nominal das barras do sistema é mostrado na tabela 5.

TABELA 5 – Carregamento das barras do sistema de 39 barras

Barra	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)
3	322,00	2,40
4	500,00	184,00
7	233,80	84,00
8	522,00	176,00
12	7,50	88,00
15	320,00	153,00
16	329,00	32,30
18	158,00	30,00
20	628,00	103,00
21	274,00	115,00
23	247,50	84,60
24	308,60	-92,00
25	224,00	47,20
26	139,00	17,00
27	281,00	75,50
28	206,00	27,60
29	283,50	26,90
31	9,20	4,60
39	1104,00	250,00

FONTE: a autora (2022).

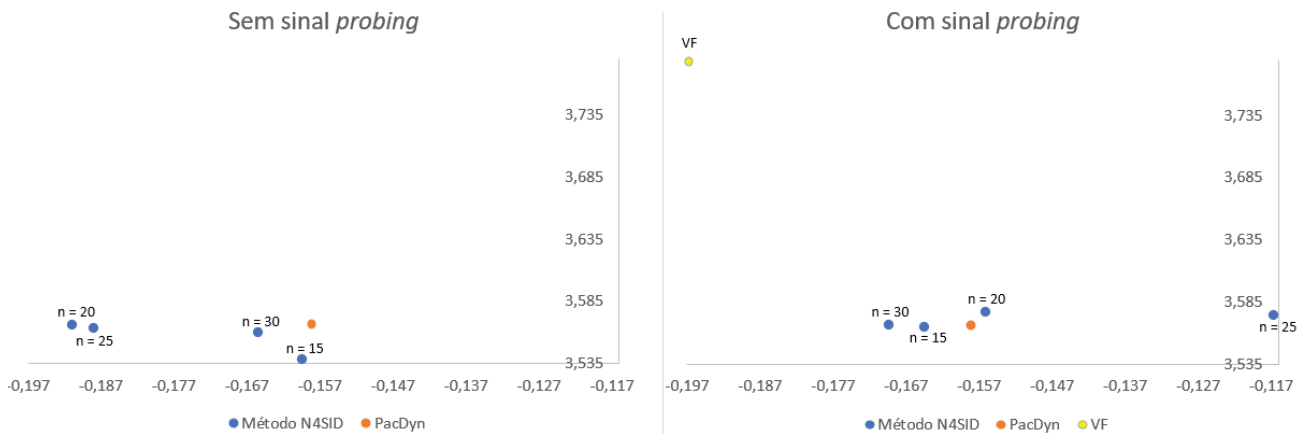
As barras 39 e 20 são as barras mais carregadas do sistema, respectivamente. Já a barra 31, é a segunda barra do sistema com menor carregamento. Dentre as barras de menor carregamento, a barra 31 é a que apresenta maior proximidade das barras 39 e 20.

### 5.2.1 Cenário 1

Na figura 20 podem ser observados os polos eletromecânicos estimados através das simulações utilizando os métodos N4SID e VF e também do PacDyn. Na tabela 6, além dos polos eletromecânicos é mostrado o fator de amortecimento.



FIGURA 20 – Polos eletromecânicos estimados através dos métodos N4SID e VF – Cenário 1



FONTE: a autora (2022).

TABELA 6 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento das simulações do Cenário 1

Método	Sem sinal de teste	Amortecimento	Método	Com sinal de teste	Amortecimento
PacDyn	-0,1581 ±3,5672i	4,43%	PacDyn	-0,1581 ±3,5672i	4,43%
N4SID (n=30)	-0,1655 ±3,5599i	4,64%	N4SID (n=30)	-0,1694 ±3,5672i	4,74%
N4SID (n=25)	-0,1880 ±3,5634i	5,27%	N4SID (n=25)	-0,1167 ±3,5745i	3,26%
N4SID (n=20)	-0,1909 ±3,5664i	5,35%	N4SID (n=20)	-0,1562 ±3,5773i	4,36%
N4SID (n=15)	-0,1594 ±3,5383i	4,50%	N4SID (n=15)	-0,1645 ±3,5652i	4,61%
Vector Fitting	N/A	N/A	Vector Fitting	-0,1968 ±3,7791i	5,20%

FONTE: a autora (2022).

Através da figura 20 e da tabela 6 é possível observar que os polos eletromecânicos estimados através do método N4SID, utilizando um sinal teste, estão mais próximos dos polos obtidos através do PacDyn do que os polos estimados através do método N4SID, sem utilizar o sinal teste.

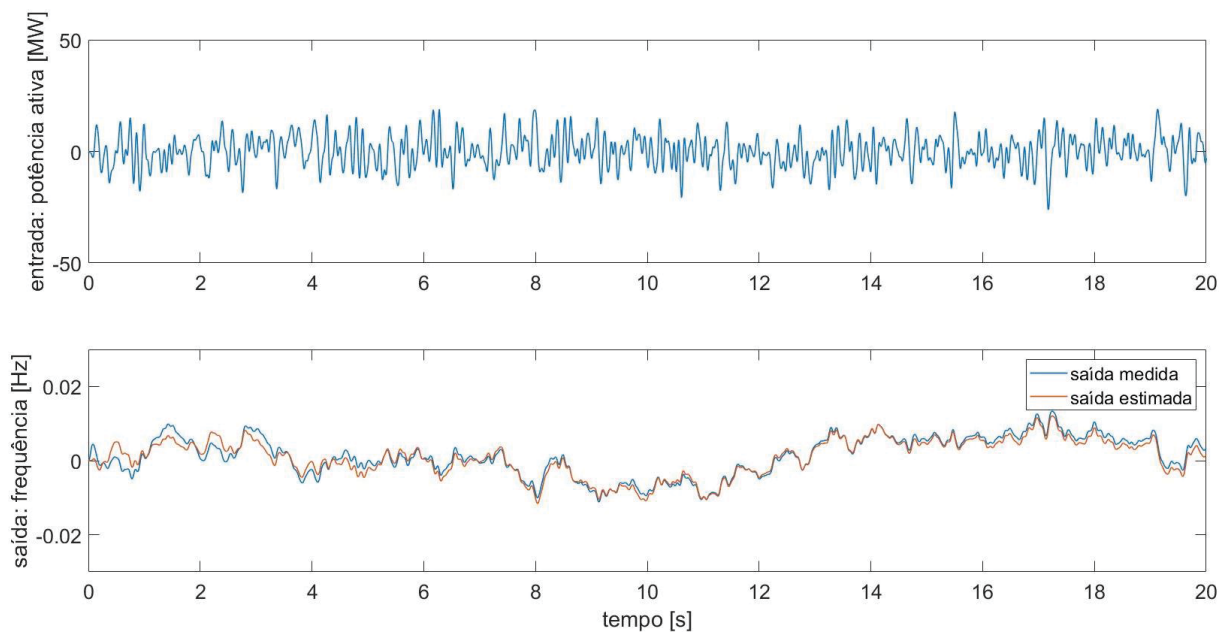
Analisando a simulação do método N4SID utilizando o sinal teste, nota-se que as simulações de ordem  $N = 15$ ,  $N = 20$  e  $N = 30$  estimaram polos mais próximos aos estimados através do Pacdyn. Já a simulação de ordem  $N = 25$ , estimou polos eletromecânicos que apresentaram parte real mais distante, quando comparados aos polos estimados pelo PacDyn.

Nas simulações do método N4SID sem utilizar o sinal teste, as ordens  $N = 15$  e  $N = 30$  estimaram polos mais próximos aos estimados através do Pacdyn. Já as simulações de ordem  $N = 20$  e  $N = 25$ , estimaram polos eletromecânicos que apresentaram parte real mais distante, quando comparados aos polos estimados pelo PacDyn.

Comparando a taxa de amortecimento e os polos obtidos através dos métodos N4SID e *Vector Fitting*, é possível observar que o método N4SID apresentou melhor desempenho do que o método VF. Apesar disso, o método VF demonstrou ainda ser uma alternativa válida para a estimação de modos eletromecânicos neste cenário. Isso também pode ser observado na figura 21.

Na figura 21, que mostra resultados obtidos na simulação utilizando o método VF, é apresentada a entrada, que consiste na variação de potência ativa da barra 20, e como saída a frequência na barra 31, comparando a saída estimada com a medida. Nessa figura é apresentada apenas uma janela dos resultados obtidos para uma melhor visualização.

FIGURA 21 – Entrada medida (Potência Ativa - barra 20) e Saída Medida e Estimada (Frequência – barra 31)



FONTE: A autora (2022).

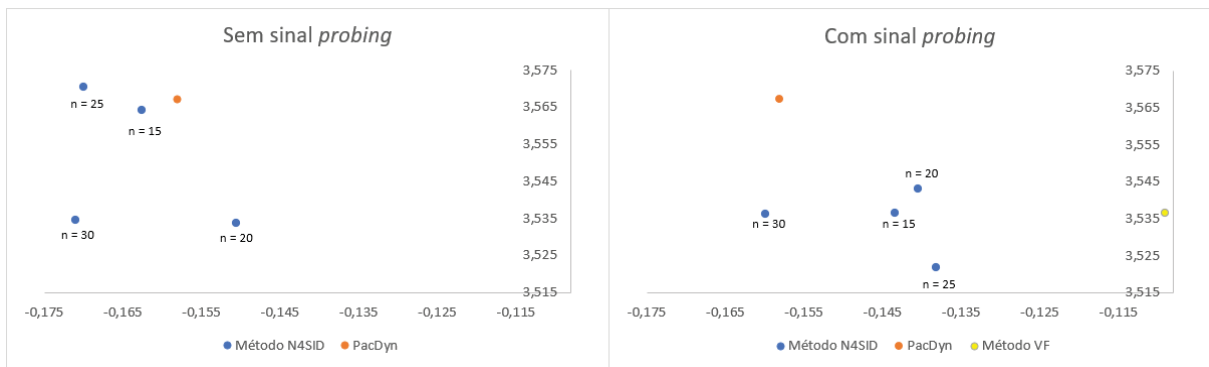
Para verificar a acurácia entre a saída medida e a saída estimada, foi calculado o MSE (*Mean Squared Error*). Para a saída estimada referente a frequência foi obtido o valor MSE de 0,0013.

Para este caso verificou-se que o algoritmo N4SID estimou modelos com autovalores instáveis. Portanto, modelos cujas saídas divergem para  $\pm\infty$  ao longo do tempo. Por esse motivo, optou-se por não adicionar nesse trabalho as saídas estimadas pelo algoritmo N4SID.

## 5.2.2 Cenário 2

Na figura 22, que mostra resultados obtidos na simulação utilizando o método VF, são mostrados os polos eletromecânicos estimados através das simulações utilizando os métodos N4SID e VF, e também do PacDyn. Na tabela 7, além dos polos eletromecânicos é mostrado o fator de amortecimento.

FIGURA 22 – Polos eletromecânicos estimados através dos métodos N4SID e VF – Cenário 2



FONTE: a autora (2022).

TABELA 7 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento das simulações do Cenário 2

Método	Sem sinal de teste	Amortecimento	Método	Com sinal de teste	Amortecimento
PacDyn	-0,1581 ±3,5672i	4,43%	PacDyn	-0,1581 ±3,5672i	4,43%
N4SID (n=30)	-0,1699 ±3,5703i	4,75%	N4SID (n=30)	-0,1599 ±3,5363i	4,52%
N4SID (n=25)	-0,1626 ±3,5643i	4,56%	N4SID (n=25)	-0,1382 ±3,5217i	3,92%
N4SID (n=20)	-0,1506 ±3,5338i	4,26%	N4SID (n=20)	-0,1405 ±3,5431i	3,96%
N4SID (n=15)	-0,1710 ±3,5346i	4,83%	N4SID (n=15)	-0,1434 ±3,5366i	4,05%
<i>Vector Fitting</i>	N/A	N/A	<i>Vector Fitting</i>	-0,1090 ±3,5366i	3,08%

FONTE: a autora (2022).

Através da figura 22 e da tabela 7 é possível observar que, nesse novo cenário 2, os polos eletromecânicos estimados através do método N4SID, sem utilizar um sinal teste, estão mais próximos aos polos obtidos através do PacDyn do que os polos estimados através do método N4SID, utilizando o sinal teste.

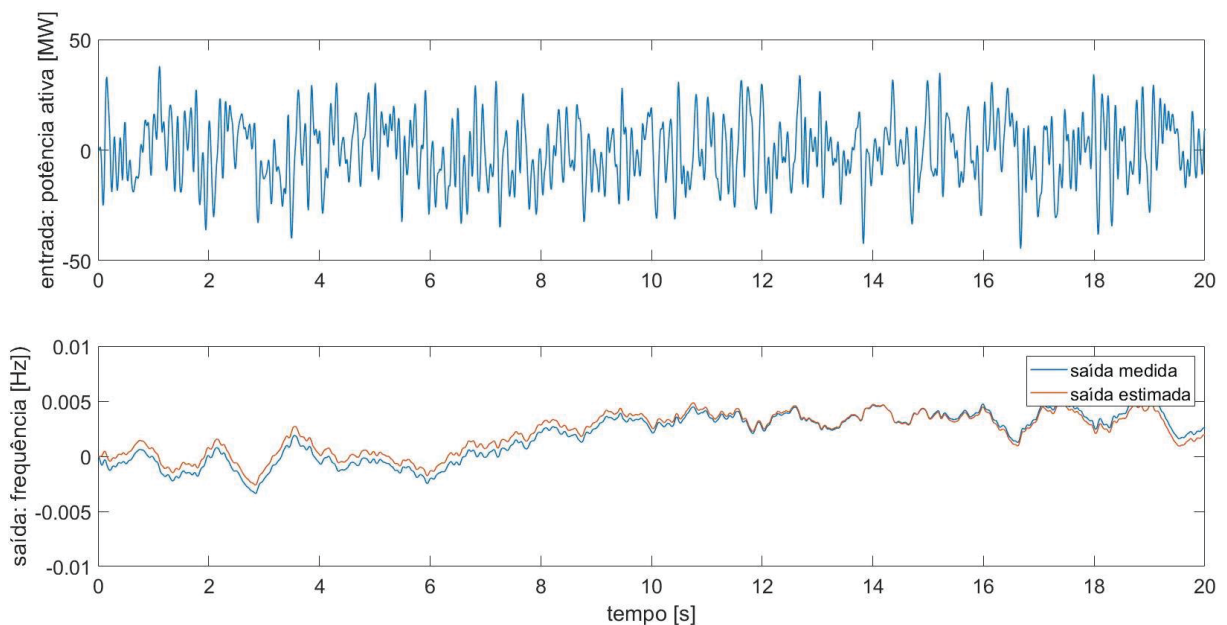
Analisando a simulação do método N4SID utilizando o sinal teste, nota-se que as simulações de ordem  $N=15$ ,  $N=20$ ,  $N=25$  e  $N=30$  não estimaram polos próximos ao estimado através do Pacdyn. As simulações de ordem  $N=25$  estimaram os polos mais distantes, quando comparados aos polos obtidos através do PacDyn.

Nas simulações do método N4SID sem utilizar o sinal teste, as ordens  $N=15$  e  $n=25$  estimaram polos mais próximos ao estimado através do Pacdyn. Já as simulações de ordem  $N=20$  e  $N=30$ , estimaram polos eletromecânicos que apresentaram parte imaginária mais distante, quando comparados aos polos obtidos através do PacDyn.

Comparando a taxa de amortecimento e os polos obtidos através dos métodos N4SID e *Vector Fitting*, é possível observar que o método N4SID apresentou melhor desempenho do que o método VF. Apesar disso, o método VF demonstrou ainda ser uma alternativa válida para a estimação de modos eletromecânicos neste cenário. Isso também pode ser observado na figura 23.

Na figura 23, que mostra resultados obtidos na simulação utilizando o método VF, é apresentada a entrada, que consiste na variação de potência ativa da barra 39, e como saída a frequência na barra 39, comparando a saída estimada com a medida. Nessa figura é apresentada apenas uma janela dos resultados obtidos para uma melhor visualização.

FIGURA 23 – Entrada medida (Potência Ativa - barra 39) e Saída Medida e Estimada (Frequência – barra 39)



FONTE: a autora (2022).

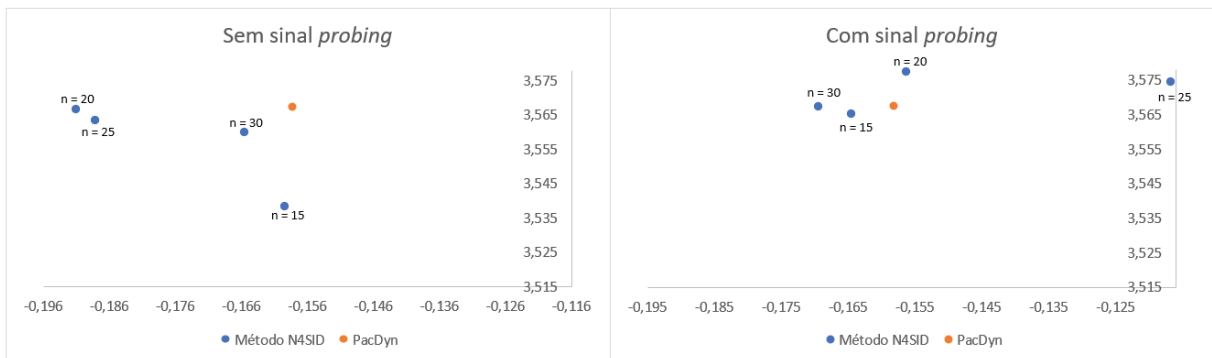
Para verificar a acurácia entre a saída medida e a saída estimada, foi calculado o MSE (*Mean Squared Error*). Para a saída estimada referente a frequência foi obtido o valor MSE de  $3,3407 \times 10^{-5}$ .

Para este caso verificou-se que o algoritmo N4SID estimou modelos com autovalores instáveis. Portanto, modelos cujas saídas divergem para  $\pm$  infinito ao longo do tempo. Por esse motivo, optou-se por não adicionar nesse trabalho as saídas estimadas pelo algoritmo N4SID.

### 5.2.3 Cenário 3

Na figura 24 são mostrados os polos eletromecânicos estimados através das simulações utilizando o método N4SID e também do PacDyn. Na tabela 8, além dos polos eletromecânicos é mostrado o fator de amortecimento.

FIGURA 24 – Polos eletromecânicos estimados através do método N4SID – Cenário 3



FONTE: a autora (2022).

TABELA 8 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento das simulações do Cenário 3

Método	Sem sinal de teste	Amortecimento	Método	Com sinal de teste	Amortecimento
PacDyn	-0,1581 ±3,5672i	4,43%	PacDyn	-0,1581 ±3,5672i	4,43%
n=30	-0,1655 ±3,5599i	4,64%	n=30	-0,1694 ±3,5672i	4,74%
n=25	-0,1880 ±3,5634i	5,27%	n=25	-0,1167 ±3,5745i	3,26%
n=20	-0,1909 ±3,5664i	5,35%	n=20	-0,1562 ±3,5773i	4,36%
n=15	-0,1594 ±3,5383i	4,50%	n=15	-0,1645 ±3,5652i	4,61%

FONTE: a autora (2022).

Através da figura 24 e da tabela 8 é possível observar que os polos eletromecânicos estimados através do método N4SID, utilizando um sinal teste, estão mais próximos dos polos obtidos através do PacDyn do que os polos estimados através do método N4SID, sem utilizar o sinal teste.

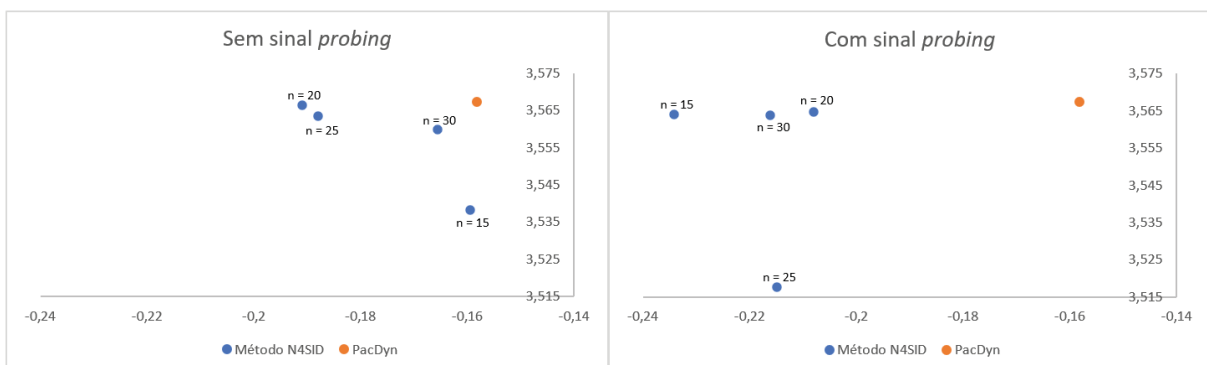
Analisando a simulação do método N4SID utilizando o sinal teste, nota-se que as simulações de ordem  $N = 15$ ,  $N = 20$  e  $N = 30$  estimaram polos mais próximos ao estimado através do Pacdyn. Já a simulação de ordem  $N = 25$ , estimou polos eletromecânicos que apresentaram parte real mais distante.

Nas simulações do método N4SID sem utilizar o sinal teste, a ordem  $N = 30$  estimou polos mais próximos ao estimado através do Pacdyn. Já as simulações de ordem  $N = 15$ ,  $N = 20$  e  $N = 25$ , estimaram polos eletromecânicos mais distantes. Os polos estimados na ordem  $N = 15$  apresentaram parte imaginária mais distante e parte real mais próxima, enquanto os polos estimados nas ordens  $N = 20$  e  $N = 25$  apresentaram parte imaginária mais próxima e parte real mais distante dos polos estimados através do PacDyn.

#### 5.2.4 Cenário 4

Na figura 25 são mostrados os polos eletromecânicos estimados através das simulações utilizando o método N4SID e também do PacDyn. Na tabela 9, além dos polos eletromecânicos é mostrado o fator de amortecimento.

FIGURA 25 – Polos eletromecânicos estimados através do método N4SID – Cenário 4



FONTE: a autora (2022).

TABELA 9 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento das simulações do Cenário 4

Método	Sem sinal de teste		Amortecimento	Método	Com sinal de teste		Amortecimento
PacDyn	-0,1581	$\pm 3,5672i$	4,43%	PacDyn	-0,1581	$\pm 3,5672i$	4,43%
n=30	-0,1655	$\pm 3,5599i$	4,64%	n=30	-0,2162	$\pm 3,5638i$	6,06%
n=25	-0,1880	$\pm 3,5634i$	5,27%	n=25	-0,2149	$\pm 3,5176i$	6,10%
n=20	-0,1909	$\pm 3,5664i$	5,35%	n=20	-0,2080	$\pm 3,5646i$	5,83%
n=15	-0,1594	$\pm 3,5383i$	4,50%	n=15	-0,2342	$\pm 3,5640i$	6,56%

FONTE: a autora (2022).

Através da figura 25 e da tabela 9 é possível observar que, nesse novo cenário 4, os polos eletromecânicos estimados através do método N4SID, sem utilizar um sinal teste, estão mais próximos dos polos obtidos através do PacDyn do que os polos estimados através do método N4SID, utilizando o sinal teste.

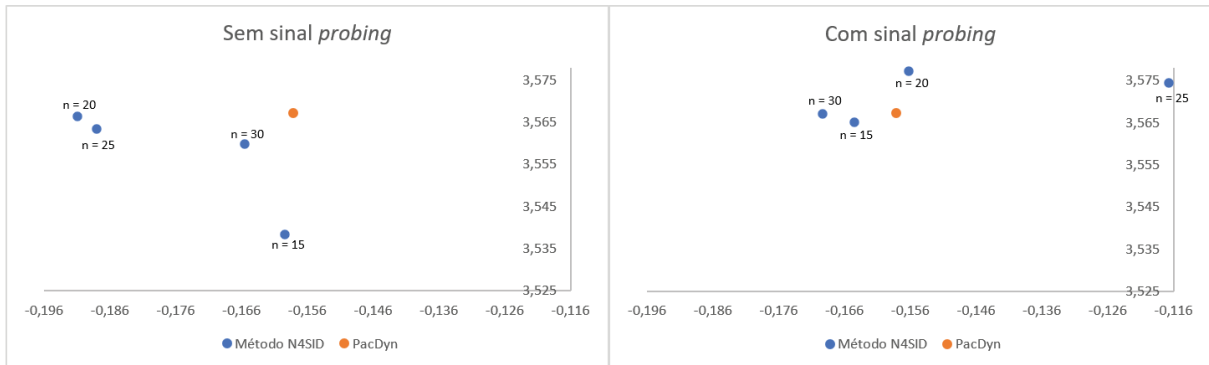
Analisando a simulação do método N4SID utilizando o sinal teste, nota-se que as simulações de ordem  $N = 15$ ,  $N = 20$ ,  $N = 25$  e  $N = 30$  não estimaram polos próximos ao estimado através do Pacdyn. Dentre todas as simulações, a simulação de ordem  $N = 25$  apresentou os polos mais distantes daqueles estimados pelo PacDyn.

Nas simulações do método N4SID sem utilizar o sinal teste, a ordem  $N = 30$  estimou os polos mais próximos aos estimados através do Pacdyn. Já as simulações de ordem  $N = 15$ ,  $N = 20$  e  $N = 25$ , estimaram polos eletromecânicos mais distantes. Os polos estimados na ordem  $N = 15$  apresentaram parte imaginária mais distante e parte real mais próxima, enquanto os polos estimados nas ordens  $N = 20$  e  $N = 25$  apresentaram parte imaginária mais próxima e parte real mais distante.

### 5.2.5 Cenário 5

Na figura 26 são mostrados os polos eletromecânicos estimados através das simulações utilizando o método N4SID e também do PacDyn. Na tabela 10, além dos polos eletromecânicos é mostrado o fator de amortecimento.

FIGURA 26 – Polos eletromecânicos estimados através do método N4SID – Cenário 5



FONTE: a autora (2022).

TABELA 10 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento das simulações do Cenário 5

Método	Sem sinal de teste	Amortecimento	Método	Com sinal de teste	Amortecimento
PacDyn	-0,1581 ±3,5672i	4,43%	PacDyn	-0,1581 ±3,5672i	4,43%
n=30	-0,1655 ±3,5599i	4,64%	n=30	-0,1694 ±3,5672i	4,74%
n=25	-0,1880 ±3,5634i	5,27%	n=25	-0,1167 ±3,5745i	3,26%
n=20	-0,1909 ±3,5664i	5,35%	n=20	-0,1562 ±3,5773i	4,36%
n=15	-0,1594 ±3,5383i	4,50%	n=15	-0,1645 ±3,5652i	4,61%

FONTE: a autora (2022).

Através da figura 26 e da tabela 10 é possível observar que os polos eletromecânicos estimados através do método N4SID, utilizando um sinal teste, estão mais próximos dos polos obtidos através do PacDyn do que os polos estimados através do método N4SID, sem utilizar o sinal teste.

Analisando a simulação do método N4SID utilizando o sinal teste, nota-se que as simulações de ordem  $N = 15$ ,  $N = 20$  e  $N = 30$  estimaram polos mais próximos ao estimado através do Pacdyn. Já a simulação de ordem  $N=25$ , estimou polos eletromecânicos que apresentaram parte real mais distante.

Nas simulações do método N4SID sem utilizar o sinal teste, a ordem  $N = 30$  estimou polos mais próximos ao estimado através do Pacdyn. Já as simulações de ordem  $N = 15$ ,  $N = 20$  e  $N = 25$ , estimaram polos eletromecânicos mais distantes. Os polos estimados na ordem  $N=15$  apresentaram parte imaginária mais distante e parte real mais próxima, enquanto os polos estimados nas ordens  $N = 20$  e  $N = 25$  apresentaram parte imaginária mais próxima e parte real mais distante, se comparados aos polos estimados através do software PacDyn.



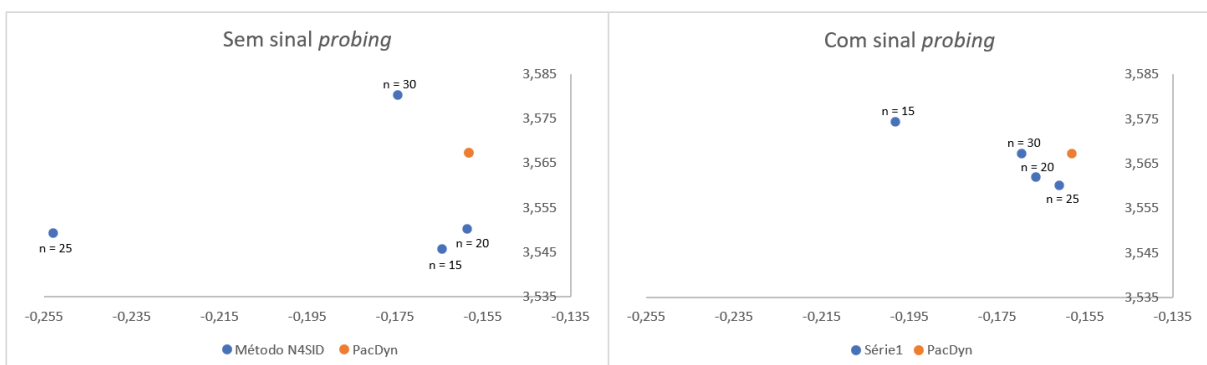
### 5.2.6 Cenário 6

No cenário 6, utilizando o *software* Anatem, foi variada aleatoriamente em 5% em relação ao seu valor nominal a potência ativa das barras que possuem nível mais elevado de carga, ou seja, foi variada a potência ativa das barras 3, 4, 8, 15, 16, 20, 24, 29, 39 e como resultado foi observada a frequência em todas as barras com geradores do sistema, ou seja, nas barras 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 39. Utilizando como sinais de entrada e de saída os dados obtidos através do Anatem, foram programados algoritmos dos métodos N4SID. Nestas simulações foi considerado como sinal de entrada a variação de potência ativa das barras 3, 4, 8, 15, 16, 20, 24, 29, 39 e como saída foi estimada a frequência das barras 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 39. Estas saídas estimadas foram comparadas com os dados de frequência das barras 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 39 obtidos através do Anatem.

Utilizando o método N4SID, foram realizadas simulações considerando um sinal de entrada e sem considerar um sinal de entrada. Para ambos os casos foram observados os polos eletromecânicos e fator de amortecimento estimados para o sistema. Nestas simulações foram utilizadas ordens  $N$  igual a  $N = 15$ ,  $N = 20$ ,  $N = 25$  e  $N = 30$ .

Na figura 27 são mostrados os polos eletromecânicos estimados através das simulações utilizando o método N4SID e também do PacDyn. Na tabela 11, além dos polos eletromecânicos é mostrado o fator de amortecimento.

FIGURA 27 – Polos eletromecânicos estimados através do método N4SID – Cenário 6



FONTE: a autora (2022).

TABELA 11 – Polos eletromecânicos e fator de amortecimento das simulações do Cenário 6

Método	Sem sinal de teste		Amortecimento	Método	Com sinal de teste		Amortecimento
PacDyn	-0,1581	$\pm 3,5672i$	4,43%	PacDyn	-0,1581	$\pm 3,5672i$	4,43%
n=30	-0,1744	$\pm 3,5802i$	4,87%	n=30	-0,1695	$\pm 3,5672i$	4,75%
n=25	-0,2530	$\pm 3,5494i$	7,11%	n=25	-0,1608	$\pm 3,5601i$	4,51%
n=20	-0,1586	$\pm 3,5503i$	4,46%	n=20	-0,1662	$\pm 3,5619i$	4,66%
n=15	-0,1643	$\pm 3,5457i$	4,63%	n=15	-0,1982	$\pm 3,5743i$	5,54%

FONTE: a autora (2022).

Através da figura 27 e da tabela 11 é possível observar que os polos eletromecânicos estimados através do método N4SID, utilizando um sinal teste, estão mais próximos dos polos obtidos através do PacDyn do que os polos estimados através do método N4SID, sem utilizar o sinal teste.

Analisando a simulação do método N4SID utilizando o sinal teste, nota-se que as simulações de ordem  $N = 20$ ,  $N = 25$  e  $N = 30$  estimaram polos mais próximos ao estimado através do Pacdyn. Já a simulação de ordem  $N = 15$ , estimou polos eletromecânicos que apresentaram parte real mais distante.

Nas simulações do método N4SID sem utilizar o sinal teste, a ordem  $N = 25$  estimou os polos mais distantes dos estimados através do Pacdyn, se comparados com as simulações das demais ordens. Já as simulações de ordem  $N = 15$ ,  $N = 20$  e  $N = 30$  estimaram polos eletromecânicos mais próximos aos polos estimados através do software PacDyn.

## 6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foram aplicados e comparados o desempenho de dois métodos de estimação de modos eletromecânicos, quais sejam, os métodos VF e N4SID. Nas análises foram considerados como sinais de teste (*probing*) os sinais de potência ativa de carga nos barramentos do sistema, mediante operação do sistema em regime quase-estacionário (dados ambiente). A finalidade dessas análises foi verificar o desempenho do método VF quando comparado a outros métodos que também possibilitam a utilização de sinais *probing* em sua formulação.

O estudo teve início com a simulação um sistema teste de 11 barras nos programas ANAREDE e ANATEM, para simular o comportamento da operação em regime quase-estacionário dos sistemas testes. Através dos resultados obtidos para esse sistema, foi observada a capacidade do algoritmo do Método *Vector Fitting* em gerar modelos cujas saídas aproximam-se satisfatoriamente dos dados medidos. Os resultados obtidos demonstraram que o método VF apresentou melhor desempenho quando comparado ao método N4SID utilizando sinal teste, tanto no aspecto dos polos eletromecânicos estimados quanto na taxa de amortecimento.

Sob uma perspectiva mais ampla, os resultados também mostraram o potencial geral da utilização de sinais *probing* na estimação de modos eletromecânicos de SEPs. Nesse sentido, as simulações utilizando o Método N4SID com sinal teste apresentaram polos eletromecânicos visivelmente mais próximos dos polos do sistema em comparação às simulações que não utilizaram o sinal teste.

Dando continuidade às análises foi estudada a aplicação dos Métodos VF e N4SID a mais um estudo de caso benchmark, que consiste em um sistema de 39 barras. Seguindo os mesmos passos da análise do sistema de 11 barras, foram escolhidos seis cenários para realizar as simulações.

Nesses cenários, foram escolhidas determinadas barras do sistema de acordo com sua localização no sistema e seu nível de carga. Analisando os resultados obtidos nos cenários 1 e 2, através dos dois métodos que utilizam sinal de teste, ou seja, os métodos N4SID e VF com sinal *probing*, observou-se que os polos eletromecânicos estimados pelo método N4SID estão mais próximos dos polos estimados pelo *software* PacDyn do que os polos estimados pelo método VF. Comparando as simulações realizadas utilizando o método N4SID, com e sem o sinal de teste, nos

cenários 1, 3, 5 e 6, os polos eletromecânicos estimados através do método N4SID, utilizando um sinal teste, estão mais próximos dos polos obtidos através do PacDyn do que os polos estimados através do método N4SID, sem utilizar o sinal teste. Já nos cenários 2 e 4 os polos eletromecânicos estimados através do método N4SID, sem utilizar um sinal teste, estão mais próximos dos polos obtidos através do PacDyn do que os polos estimados através do método N4SID, utilizando o sinal teste.

Ao longo deste trabalho, vários desafios foram enfrentados. O primeiro deles, foi a determinação de cenários que seriam considerados nas simulações dos sistemas de 11 e 39 barras. O pré-processamento dos sinais utilizados nas simulações e a implementação do algoritmo do método *Vector Fitting* em Matlab também foram desafios encontrados ao longo deste estudo.

Levando-se em conta os resultados obtidos a partir dos sistemas de 11 e de 39 barras analisados no presente trabalho, conclui-se que os objetivos específicos foram plenamente cumpridos, tanto no sentido de se propor uma adaptação do Método VF para a identificação de modos eletromecânicos de SEPs com sinal de teste como também comparar seu desempenho com o tradicional método N4SID. As vantagens e desvantagens de cada método foram também evidenciadas.

Com isso posto, conclui-se que o objetivo geral do presente trabalho também foi cumprido. Nesse sentido, foram investigados os ganhos passíveis de serem obtidos na estimação de modos oscilatórios quando sinais de teste são incluídos como sinais de entrada em técnicas de identificação de sistemas.

## 6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Verifica-se a necessidade de aprofundar os estudos para a estimação de modos eletromecânicos, utilizando sinais *probing* juntamente com dados reais de SEP coletados através de PMUs para trabalhos futuros. Mais testes devem ser realizados para aprimorar a metodologia utilizada neste estudo, sobretudo, no que diz respeito à sistemas reais de grande porte. Verifica-se também a necessidade de aplicar o método *Vector Fitting* em sistemas com múltiplas entradas e saídas, permitindo, assim, tornar os resultados obtidos mais precisos e também a aplicação desse algoritmo em sistemas mais complexos.

## REFERÊNCIAS

- AMIN, M. M.; MOUSSA, H. B.; MOHAMMED, O. A. Development of a Wide Area Measurement System for Smart Grid Applications. *Proceedings of the World Congress The International Federation of Automatic Control*, v. 18, p. 1672-1677, 2012.
- AMINIFAR, F.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; SAFDARIAN, A.; DAVOUDI, A.; SHAHIDEHPOUR, M. Synchrophasor Measurement Technology in Power Systems: Panorama and State-of-the-Art. *IEEE Access*, v. 2, p. 1607-1628, 2014.
- BRADDE, T.; CHEVALIER, S.; STEFANO, M. D.; GRIVET-TALOCIA, S.; DANIEL, L. Handling Initial Conditions in Vector Fitting for Real Time Modeling of Power System Dynamics. *Energies*, v. 14, n. 2471, p. 1-21, 2021.
- BOTELHO, B. D. *Uma Metodologia de Análise de Desempenho Econômico dos Serviços de Atendimento Emergencial ao Consumidor de Energia Elétrica: Estudo de Caso do Ceará*. 2010. Dissertação (Mestrado em Gestão Logística) – Curso de Logística e Pesquisa Operacional – Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza, 2010.
- COMITÊ INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CIGRE, *C2 Power system operation and control, Wide area monitoring systems – Support for control room applications*, 2018.
- COSTA JUNIOR, A. G.; RIUL, J.; MONTENEGRO, P. Identificação de Modelos por Subespaços, usando o Método N4SID, para a Simulação do Controle LQR em um Manipulador Robótico. *XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)*, s. v., p. 1759-1764, 2015.
- CROW, M. L.; SINGH, A. The matrix pencil for power system modal extraction. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 1, p. 501-502, 2005.
- DECKER, I. C.; SILVA, A. S.; AGOSTINI, M. N.; LEANDRO, R. B.; SILVA, P. A. S.; VIEIRA, P. C. C.; ZIMMER, V.; JARDIM, J. L. A.; MACHADO, Z.; SILVEIRA, L. M. G.; PINHEIRO, L.; FONTANA, E.; BASTOS, M. R. Sistema Piloto para Avaliação de Segurança Dinâmica Baseado em Regiões de Segurança e Medição Fasorial Sincronizada. *Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, UFSC, CTEEP e HPPA*, s.l., 2012.
- DESCHRIJVER, D.; HAEGEMAN, B.; DHAENE, T. Orthonormal Vector Fitting: A robust macromodeling tool for rational approximation of frequency domain responses. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, v. 30, n. 2, p. 216–225, 2007.
- DESCHRIJVER, D.; MROZOWSKI, M.; DHAENE, T.; DEZUTTER, D. Macromodeling of multiport systems using a fast implementation of the vector fitting method. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 18, n. 6, p. 383–385, 2008.
- DOSIEK, L.; PIERRE, J. W.; FOLLUM, J. A Recursive Maximum Likelihood Estimator for the Online Estimation of Electromechanical Modes With Error Bounds. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 1, p. 441-451, 2013, a.

DOSIEK, L.; PIERRE, J. W. Estimating electromechanical modes and mode shapes using the multichannel ARMAX model. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 2, p. 1950-1959, 2013, b.

FAN, X.; XIONG, F.; JIANG, L. PMU-WAMS research and application in Brazil. *Global Energy Interconnection*. v. 2, p. 85-93, 2019.

GAJARE, S.; RAO, J. G.; NAIDU, O. D.; PRADHAN, A. K. Wide-area measurement system-based supervision of protection schemes with minimum number of phasor measurement units. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 375, p. 1-18, 2017.

GOMES JUNIOR, S.; CASTRO, A. D.; PARREIRAS, T. J. M. A. Integração entre o Pacdyn e Anatem para Estudos Dinâmicos de Sistemas Elétricos. *XX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, v. 20, p. 1-8, 2009.

GRIVET-TALOCIA, S. Package macromodeling via time-domain Vector Fitting. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 13, n. 11, p. 472–474, 2003.

GRIVET-TALOCIA, S.; GUSTAVSEN, B. *Passive Macromodeling: Theory and Applications*. New Jersey: John Wiley and Sons Inc., 2016.

GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 3, p. 1052-1061, 1999.

GUSTAVSEN, B. Computer code for rational approximation of frequency dependent admittance matrices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 4, p.1093–1098, 2002.

GUSTAVSEN, B. Wide band modeling of power transformers. *IEEE Trans. PowerDeliv.*, v. 19, n. 1, p. 414–422, 2004.

GUSTAVSEN, B. Improving the pole relocating properties of vector fitting. *IEEE Trans. Power Deliv.*, v. 21, n. 3, p. 1587–1591, 2006.

HADLEY, M. D.; MCBRIDE, J. B.; EDGAR, T. W.; O'NEIL, L. R.; JOHNSON, J. D. *Securing Wide Area Measurement Systems*, 2007.

HAUER, J. F.; DEMEURE, C. J.; SCHARF, L. L. Initial results in Prony analysis of power system response signals. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 5, n. 1, p. 80-89, 1990.

HENDRICKX, W.; DHAENE, T. A discussion of “rational approximation of frequency domain responses by Vector Fitting. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 1, p. 441–443, 2006.

HEUBERGER, P. S. C.; VANDENHOF, P. M. J.; WAHLBERG, B. *Modelling and Identification with Rational Orthogonal Basis Functions*. London: Springer-Verlag, 2005.

IHLENFELD, L.P.R.K., OLIVEIRA, G.H.C., SANS, M.R. A data passivity-enforcement preprocessing approach to multiport system modeling. *IEEE Trans. PowerDeliv.*, v. 31, n. 3, p. 1351–1359, 2016.

JESUS, S. M. M. *Mestrado Integrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações*. 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações) – Curso de Engenharia Electrónica e Telecomunicações – Universidade do Algarve, 1992.

KATAYAMA, T. *Subspace Methods for System Identification - A Realization Approach*, Germany: Springer, 2005.

KNOCKAERT, L. Comments on “macromodeling of multiport systems using a fast implementation of the vector fitting method”. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 19, n. 9, p. 602–602, 2009.

KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, 1994.

LEANDRO, R. B. *Identificação em Tempo Real de Oscilações Eletromecânicas Utilizando Sincrofasores*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

LEANDRO, R. B.; DECKER, I. C.; SILVA, A. S.; AGOSTINI, M. Identification of the Oscillation Modes of a Large Power System Using Ambient Data. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 26, n. 4, p. 441–453, 2015.

MEKONNEN, Y. S.; SCHUTT-AINÉ, J. E. Broadband macromodeling of sampled frequency data using z-domain Vector-Fitting method. *IEEE Workshop on Signal Propagation on Interconnects*, s. n., p. 45–48, 2007.

NORONHA NETO, C. C. *Integração das Equações Diferenciais do Filtro Digital Butterworth Mediante Algoritmo de Quadratura Numérica de Ordem Elevada*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Curso de Engenharia – Universidade de São Paulo, 2003.

NOURI, B.; ACHAR, R.; NAKHLA, M. S. z-domain orthonormal basis functions for physical system identifications. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, v. 33, n. 1, p. 293–307, 2010.

NI, J.; SHEN, C.; FENG, L. Estimation of the electromechanical characteristics of power systems based on a revised stochastic subspace method and the stabilization diagram. *Science China Technological Sciences*, v. 55, n. 6, p. 1677-1687, 2012.

OLIVEIRA, G.H.C.; RODIER, C.; IHLENFELD, L.P.R.K. LMI-based method for estimating passive blackbox models in power systems transient analysis. *IEEE Trans. Power Deliv.*, v. 31, n. 1, p. 3–10, 2016.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, Submódulo 11.8, Sistema de Medição de Sincrofasores, Resolução Normativa nº 873/20 - Versão decorrente da Consulta Pública nº 030/2019, 2020.

OVERSCHEE, P. V.; MOOR, B. D. N4SID: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems. *Automatica*, v. 30, n. 1, p. 75-93, 1994.

PACKAGE vectfit3. Frequency-Domain Vector Fitting Implementation. 2008.[Online]. Disponível em: <http://www.sintef.no/projectweb/vectfit/>.

PAI, M. A. *Energy Function Analysis for Power System Stability*. New York: Springer New York, 1989.

PAPADOPOULOS, T. A.; CHRYSOCHOS, A. I.; KONTIS, E. O.; PAPAGIANNIS, G. K. Ringdown analysis of power systems using vector fitting. *Electric Power Systems Research*, v. 141, p. 100-103, 2016.

PASSOS, E. Z. *Proposta de diagrama de estabilização para identificação de dinâmicas oscilatórias eletromecânicas em sistemas elétricos de potência*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Paraná, 2020.

PASSOS, E. Z.; KUIAVA, R.; OLIVEIRA, G. H. C.; PEDRETTI, A. Aplicação de Diagramas de Estabilização para a Identificação de Dinâmicas Oscilatórias Eletromecânicas a partir da Estimação Modal em Sinais de  $\mu$ PMU's. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, v. 1, n. 1, 2020.

PIERRE, J. W.; TRUDNOWSKI, D. J.; DONNELLY, M. K. Initial results in electromechanical mode identification from ambient data. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 12, n. 3, p. 1245-1251, 1997.

PIERRE, J. W.; TRUDNOWSKI, D.; DONNELLY, M.; ZHOU, N.; TUFFNER, F. K.; DOSIEK, L. Overview of System Identification for Power Systems from Measured Responses. *IFAC Symposium on System Identification The International Federation of Automatic Control*, v. 16, p. 989-1000, 2012.

QIN, S. J. An overview of subspace identification. *Computers & Chemical Engineering*, v. 30, n. 10–12, p. 1502-1513, 2006.

RAMALHO, C. E. *Sistema de sincronização de geradores síncronos distribuídos utilizando unidades de medição fasorial*, 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade de São Paulo, 2016.

RAMOS, R. A. *Procedimento de Projeto de Controladores Robustos para o Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas de Potência*, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Curso Engenharia Elétrica – Universidade de São Paulo, 2002.



RAMIREZ, A. Vector fitting-based calculation of frequency-dependent network equivalents by frequency partitioning and model-order reduction. *IEEE Trans. Power Deliv.*, v. 24, n. 1, p. 410–415, 2009.

REIS, A. W. *Simulação de uma Unidade de Medição Fasorial utilizando Typhoon Virtual Hil*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

RICCO, A. R. *Identificação de Sistemas Utilizando Métodos de Subespaço*, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

ROGERS, G. *Power System Oscillations*. New York: Springer New York, 2000.

SANATHANAN, C. K.; KOERNER, J. Transfer Function Synthesis as a Ratio of Two Complex Polynomials. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 8, n. 1, p. 56–58, 1963.

SARMADI, S. A. N.; VENKATASUBRAMANIAN, V. Electromechanical Mode Estimation Using Recursive Adaptive Stochastic Subspace Identification. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 29, n. 1, p. 349-358, 2014.

SCHMITT, M. F. L. *Detecção de Outliers no Espaço Semântico Aplicada à Análise de Sentimento por Redes Neurais Convolucionais*. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Curso de Informática – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

SCHUMACHER, R.; LIMA, E. G.; OLIVEIRA, G. H. C. RF power amplifier behavioral Modeling based on Takenaka-Malmquist-Volterra series. *Circuits, Systems and Signal Processing*, v. 35, n. 7, p. 2298–2316, 2016.

SCHUMACHER, R.; OLIVEIRA, G. H. C. An optimal vector fitting method for estimating frequency-dependent network equivalents in power systems. *Electric Power Systems Research*, v. 150, p. 96-104, 2017.

SCHUMACHER, R.; OLIVEIRA, G. H. C.; KUIAVA, R. A novel time-domain linear ringdown method based on vector fitting for estimating electromechanical modes. *Electric Power Systems Research*, v. 160, p. 300-307, 2018.

SCHUMACHER, R.; OLIVEIRA, G. H. C.; KUIAVA, R. A multi-signal instrumental variable vector fitting method for estimating inter-area electromechanical modes of power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 111, p. 1-13, 2019.

SCHUMACHER, R. *Estimação de Oscilações e Respostas em Frequência de Sistemas de Potência via Vector Fitting Ótimo*. 2019. Tese (Doutorado em Sistemas de Energia) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

- SEPPÄNEN, J. M.; TURUNEN, J.; HAARLA, L. C.; KOIVISTO, M.; KISHOR, N. Analysis of electromechanical modes using multichannel Yule-Walker estimation of a multivariate autoregressive model. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*, v. 4, p. 1-5, 2013.
- SHARMA, R. B.; DHOLE, G. M. Wide Area Measurement Technology in Power Systems. *Procedia Technology*, v. 25, p. 718-725, 2016.
- STEIGLITZ, K.; MCBRIDE, L. E. A Technique for the Identification of Linear Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 10, n. 4, p. 461–464, 1965.
- THAMBIRAJAH, J. Comparative review of methods for stability monitoring in electrical power systems and vibrating structures. *IET Gen. Transm. Distrib.*, v. 4, p. 1086-1103, 2010.
- TRUDNOWSKI, D. J.; JOHNSON, J. M.; HAUER, J. F. Making Prony analysis more accurate using multiple signals. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 1, p. 226-231, 1999.
- TRUDNOWSKI, D. J.; PIERRE, J. W.; ZHOU, N.; HAUER, J. F.; PARASHAR, M. Performance of Three Mode-Meter Block-Processing Algorithms for Automated Dynamic Stability Assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 23, n. 2, p. 680-690, 2008.
- UBOLLI, A., GUSTAVSEN, B. Comparison of methods for rational approximation of simulated time-domain responses: ARMA, ZD-VF, and TD-VF. *IEEE Trans. Power Deliv.*, v. 26, n. 1, p. 279–288, 2011.
- VAN OVERSCHEE, P.; DE MOOR, B. N4SID: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems. *Automatica*, v. 30, n. 1, p. 75-93, 1994.
- VAN DEN HOF, P. M. J.; HEUBERGER, P. S. C.; BOKOR, J. System identification with generalized orthonormal basis functions. *Automatica*, v. 31, n. 12, p. 1821–1834, 1995.
- VANFRETTI, L.; BENGTSSON, S.; GJERDE, J. O. Preprocessing synchronized phasor measurement data for spectral analysis of electromechanical oscillations in the nordic grid. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, v. 25, n. 2, 2013.
- WONG, N.; LEI, C. IIR approximation of FIR filters via discrete-time Vector Fitting. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 56, n. 3, p. 1296–1302, 2008.
- YAZDANIAN, M.; MEHRIZI-SANI, A.; MOJIRI, M. Estimation of Electromechanical Oscillation Parameters Using an Extended Kalman Filter. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 30, n. 6, p. 2994-3002, 2015.
- ZHOU, N.; PIERRE, J. W.; HAUER, J. F. Initial results in power system identification from injected probing signals using a subspace method. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 3, p. 1296-1302, 2006.

ZHOU, N.; PIERRE, J. W.; TRUDNOWSKI, D. J.; GUTTROMSON, R. T. Robust RLS Methods for Online Estimation of Power System Electromechanical Modes. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 22, n. 3, p. 1240-1249, 2007.

ZHOU, N.; TRUDNOWSKI, D. J.; PIERRE, J. W.; MITTELSTADT, W. A. Electromechanical Mode Online Estimation Using Regularized Robust RLS Methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 23, n. 4, p. 1670-1680, 2008.