

Um Algoritmo Multiestágios para a Estimação de Modos Eletromecânicos de Sistemas de Potência^{*}

Murilo E. C. Bento^{*} Tatiane C. C. Fernandes^{**}
Ahda P. Grilo-Pavani^{***} Rodrigo A. Ramos^{****}

^{*} Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, (e-mail: murilobento@poli.ufrj.br).

^{**} Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São Carlos, SP (e-mail: tatianefernandes@ufscar.br)

^{***} Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC, SP (e-mail: ahda.pavani@ufabc.edu.br)

^{****} Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, SP (e-mail: rodrigo.ramos@ieee.org)

Abstract: The knowledge of the electromechanical modes of the power system allows the operator to identify possible small-signal stability problems and to evaluate if the continuous supply of electrical energy may be compromised. This paper proposes a multistage algorithm to estimate electromechanical modes based on measurements of Phasor Measurement Units (PMU). At each stage, the algorithm determines a mode that minimizes the mean squared error with respect to the corresponding measured signal. Thus, the algorithm starts by estimating the first mode and each subsequent stage corresponds to the estimation of another mode. The algorithm converges when the error between the measured and the reconstructed signals is smaller than a pre-defined threshold. Case studies using real PMU measurements are presented and discussed, and illustrate the effectiveness of the application of the proposed algorithm.

Resumo: O conhecimento dos modos eletromecânicos de sistemas de potência permite que o operador de sistemas identifique problemas de Estabilidade a Pequenas Perturbações e avaliar se o fornecimento contínuo de energia elétrica pode estar comprometido. Este artigo propõe um Algoritmo Multiestágios para estimar modos eletromecânicos baseados em medidas de Unidade de Medição Fasorial Sincronizada. A cada estágio, o algoritmo determina o modo que minimiza o erro quadrático médio em relação ao sinal medido. Então, o algoritmo inicia estimando o primeiro modo e cada estágio subsequente corresponderá a estimar outro modo. O algoritmo converge quando o erro entre os sinais medidos e estimados é menor que um valor pré-estabelecido. Estudos de casos utilizando dados reais de PMUs são apresentados e discutidos e ilustram a eficácia da aplicação do método proposto.

Keywords: Power System Stability; Electromechanical Modes; Signal Decomposition; Phasor Measurement Unit; Wide-Area Measurement Systems.

Palavras-chaves: Estabilidade de Sistemas de Potência; Modos Eletromecânicos; Decomposição de Sinais; Unidade de Medição Fasorial; Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada.

1. INTRODUÇÃO

Modos eletromecânicos na faixa de frequência entre 0,1 a 2,0 Hz são o principal foco de estudo em Estabilidade a Pequenos Sinais de sistemas de potência (Rogers, 2000). Estes modos quando não apropriadamente amortecidos podem induzir oscilações nas variáveis dinâmicas de sistemas de potência e podem comprometer a sua operação adequada e o fornecimento contínuo e seguro de energia elétrica aos centros de consumo. Assim, o conhecimento de modos eletromecânicos na condição de operação corrente é

essencial e desejado pelo operador de sistemas de potência, especialmente os modos que apresentam baixas taxas de amortecimento.

O desenvolvimento dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada nas últimas décadas, que apresentam Unidades de Medição Fasorial (do inglês, *Phasor Measurement Unit* (PMU) instalados em determinadas barras do sistema, permitiu a medição de tensão e corrente com altas taxas de amostragem e sincronia no tempo através do uso do Sistemas de Posicionamento Global (do inglês, *Global Positioning System* (GPS)) (Li and et al., 2010). A disponibilidade destes dados sincronizados promoveram o desenvolvimento de diferentes ferramentas para o monitoramento (Bento and Ramos, 2021), (Bento, 2022), controle (Bento, 2020) e proteção (Rivas and Abrao, 2020) de sistemas de potência. Pesquisas têm sido frequentemente desenvolvidas

^{*} Este trabalho teve o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processos #2015/24245-8 e #2018/20104-9) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (Processo #88887.510888/2020-00).

e aprimoradas para estimar modos eletromecânicos através de dados de PMUs.

Modos eletromecânicos de sistemas de potência podem ser determinados através de respostas de variáveis no domínio do tempo e no domínio da frequência diretamente de dados amostrados de PMUs. Métodos no domínio da frequência tais como os baseados em *vector fitting* (Schumacher et al., 2019), teoria de perturbações de matrizes (Mou et al., 2019), discretização infinitesimal de geradores (Ye et al., 2017), teoria de subespaços estocásticos (Philip and Jain, 2019) foram propostos mas alguns desafios ainda persistem tais como (i) tempo computacional elevado para determinar os autovalores, (ii) necessidade de simplificações do modelo para atender os requisitos de tempo de processamento e (iii) dificuldade em determinar múltiplos autovalores com baixas taxas de amortecimento.

Métodos no domínio do tempo como Prony (Hauer et al., 1990), Matrix Pencil (Crow and Singh, 2005), Empirical Mode Decomposition (Messina and Vittal, 2007) e outros foram propostos mas poucos avanços tem sido feitos nos últimos anos devido aos seguintes motivos: (i) muitas iterações e conseqüentemente um tempo computacional elevado para determinar os autovalores, (ii) necessidade de tratar o sinal medido para eliminar os ruídos e falta de dados de medição, (iii) necessidade de definir o número de autovalores a serem estimados.

A maioria das pesquisas atuais de estimação de modos eletromecânicos foram realizadas no desenvolvimento de métodos no domínio da frequência. Com o objetivo de fornecer novas ferramentas para o operador do sistema de potência, esta pesquisa propõe um método multietápios para estimar os modos eletromecânicos de sinais medidos po PMUs no domínio do tempo que procura resolver alguns problemas que ainda existem na comunidade científica. As contribuições deste artigo são:

- Os modos eletromecânicos serão estimados sem o conhecimento do número de modos a serem estimados. Cada estágio do método proposto irá estimar um modo e se o erro desejado não for alcançado, o próximo estágio do algoritmo irá estimar o próximo modo.
- O método proposto é um processo iterativo composto por três processos a cada iteração que procura minimizar um modelo de otimização.
- O método proposto é composto por um conjunto de parâmetros que podem ser ajustados e assim o operador do sistema pode definir um limite máximo de tempo de execução do método.
- Estudos de casos com sinais reais de PMUs do Sistema Interligado Brasileiro são apresentados e discutidos em detalhes.

Este artigo apresenta a seguinte organização: Seção 2 apresenta brevemente o conceito de análise de resposta de *ringdown* para estimar modos eletromecânicos de sistemas de potência, Seção 3 introduz o algoritmo multietápios proposto, Seção 4 avalia e discute o método proposto através de dois estudos de casos e Seção 5 conclue o artigo.

2. ANÁLISE DE RESPOSTA DE *RINGDOWN*

A resposta de *ringdown* ($y(t)$) em sistemas de potência após um evento de *ringdown* iniciando em $t = 0$ pode ser representado por

$$y(t) = A_{DC} + y_{OSC}(t) + y_R(t) \quad (1)$$

onde $A_{DC} \in \mathbb{R}$ representa as componentes *dc* da resposta de *ringdown*, $y_{OSC}(t)$ representa a contribuição de N_{OSC} modos oscilatórios da resposta de *ringdown* e $y_R(t)$ representa a contribuição de N_R modos de valores puramente reais da resposta de *ringdown*. A resposta $y_{OSC}(t)$ pode ser formulada como

$$\begin{aligned} y_{OSC}(t) &= \sum_{k=1}^{N_{OSC}} \frac{A_k}{2} \left(e^{j\phi_k} e^{\lambda_k t} + e^{-j\phi_k} e^{\lambda_k^* t} \right) \\ &= \sum_{k=1}^{N_{OSC}} A_k e^{\sigma_k t} \cos(\omega_k t + \phi_k) \end{aligned} \quad (2)$$

onde $\lambda_k = \sigma_k + j\omega_k$ e $\lambda_k^* = \sigma_k - j\omega_k$ são os k -th modos oscilatórios, $k = 1, \dots, N_{OSC}$, com σ_k e $\omega_k = 2\pi f_k$ ($f \neq 0$) sendo respectivamente a atenuação e a frequência de oscilação do k -ésimo modo, A_k e ω_k são as amplitudes e as fases do k -ésimo modo oscilatório respectivamente. A resposta $y_R(t)$ pode ser formulada como

$$y_R(t) = \sum_{k=N_{OSC}+1}^{N_M} A_k e^{\sigma_k t} \quad (3)$$

onde $\lambda_k = \sigma_k$ é o k -ésimo modo de valor puramente real, $k = N_{OSC}+1, \dots, N_M$, onde $N_M = N_{OSC} + N_R$ é o número total de modos.

É possível concluir de (1)-(3) que as variáveis para determinar a resposta angular $y(t)$ são N_{OSC} , N_R , A_{DC} , A_k , σ_k , ω_k e ϕ_k . Embora a equação (1) tenha três componentes de sinais, a equação (1) pode ser simplificada da seguinte maneira

$$y(t) = \sum_{k=1}^{N_M+1} A_k e^{\sigma_k t} \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (4)$$

onde para $k = 1$, $A_k = A_{DC} \neq 0$ e $\sigma_k = \omega_k = \phi_k = 0$ (componente *dc*); para $k = 2, \dots, N_{OSC}+1$, $A_k \neq 0$, $\sigma_k \neq 0$, $\omega_k \neq 0$ e $\phi_k \neq 0$ (componentes de atenuação e oscilação); para $k = N_{OSC} + 2, \dots, N_M + 1$, $A_k \neq 0$, $\sigma_k \neq 0$, $\omega_k = 0$ e $\phi_k = 0$ (componentes de atenuação).

PMUs fornecem medidas trifásicas sincronizadas de tensão e corrente nas barras onde estão instalados para cada período de tempo. Portanto, uma resposta de *ringdown* $y(t)$ pode ser fornecida e avaliada diretamente de PMUs em um intervalo de tempo de interesse. No entanto, como PMUs são compostos por elementos físicos, as medidas coletadas estão sujeitas a ruído, desordem e perda de dados.

3. MÉTODO PROPOSTO

Para estimar os modos eletromecânicos de sistemas de potência de um sinal de ringdown, um modelo de otimização e um Algoritmo Multiestágios composto por três processos são propostos pelos autores e apresentados nesta seção. A Seção 3.1 apresenta o modelo de otimização proposto, a Seção 3.2 descreve o Algoritmo Proposto composto por três diferentes processos e a Seção 3.3 descreve o Algoritmo Multiestágios proposto para estimar os modos eletromecânicos de um sinal de *ringdown*.

3.1 Modelo de Otimização

As variáveis do problema de otimização são os parâmetros do sinal descritos na Seção 2: A_k , σ_k , ω_k e ϕ_k . Então, de um sinal discreto (\hat{y}) medido por um PMU, estamos interessados em minimizar o desvio de erro quadrático médio (EQM) entre o sinal medido (\hat{y}) e os valores obtidos do modelo (1)-(3)

$$EQM(\mathbf{x}) = \frac{1}{\alpha} \sum_{t=1}^{T_{max}} \left[\hat{y}(t) - \sum_{k=1}^{N_M+1} A_k e^{\sigma_k t} \cos(\omega_k t + \phi_k) \right]^2 \quad (5)$$

para $\alpha = N_M + 1$ e sujeito a $A_k \in [A_{min}, A_{max}]$, $\sigma_k \in [\sigma_{min}, \sigma_{max}]$, $\omega_k \in [\omega_{min}, \omega_{max}]$ e $\phi_k \in [\phi_{min}, \phi_{max}]$ e assim o vetor de variáveis do problema é

$$\mathbf{x} = [A_1 \ \sigma_1 \ \omega_1 \ \phi_1 \ \cdots \ \omega_{N_M+1} \ \phi_{N_M+1}] \quad (6)$$

Pode-se verificar de (6) que quanto maior o número de modos eletromecânicos, maior o número de parâmetros do vetor de variáveis. Em algoritmos de busca, quanto maior o número de variáveis, maior a dificuldade e o tempo de convergência do algoritmo.

3.2 Algoritmo Proposto

O algoritmo proposto para resolver o problema de otimização é um algoritmo heurístico e consiste de três processos que serão executados por um número de épocas (N_E). O critério de parada deste algoritmo proposto será o número de épocas. Antes de iniciar os processos, o algoritmo atribui valores aleatórios para as variáveis da candidata N_I (\mathbf{x}_{n_I} , $n_I = 1, \dots, N_I$), respeitando os valores limites impostos. Após o cálculo da função objetivo das N_I candidatas a solução, somente aquela com a menor função objetivo (\mathbf{x}_o) irá para o próximo processo.

Processo 1: Neste processo, a melhor candidata até o momento (\mathbf{x}_o) terá um dos seus elementos do vetor mudado aleatoriamente no intervalo entre 90% e 110% em relação ao valor original e o novo valor de função objetivo é calculado. Depois deste processo ocorrer N_{P1} vezes, se o menor valor de função objetivo é melhor que a melhor candidata a solução, a melhor candidata é atualizada. O algoritmo passo-a-passo é

Passo 1: $\mathbf{x}_{n_{P1}} = \mathbf{x}_o$.

Passo 2: Escolha aleatoriamente um elemento (n_x) do vetor $\mathbf{x}_{n_{P1}}$, $n_x \in [1, N_x]$, $\mathbf{x}_{n_{P1}} \in \mathbb{R}^{N_x}$.

Passo 3: Mude o valor deste elemento aleatoriamente no intervalo de 90% a 110%

$$\mathbf{x}_{n_{P1}}(n_x) = \mathbf{x}_{n_{P1}}(n_x) \times rand(0.9, 1.1) \quad (7)$$

e calcule a nova função objetivo $EQM(\mathbf{x}_{n_{P1}})$

Passo 4: Se $EQM(\mathbf{x}_{n_{P1}}) < EQM(\mathbf{x}_o)$, então $\mathbf{x}_o = \mathbf{x}_{n_{P1}}$.

Passo 5: Se $n_{P1} = N_{P1}$, pare o algoritmo; caso contrário, $n_{P1} = n_{P1} + 1$ e vá para o Passo 1.

Processo 2: Neste processo, a melhor candidata até o momento (\mathbf{x}_o) terá um de seus elementos do vetor mudado aleatoriamente no intervalo entre os valores mínimo e máximo da variável correspondente e o novo valor da função objetivo será calculado. Depois deste processo ocorrer N_{P2} vezes, se o menor valor de função objetivo é melhor que a melhor candidata a solução, a melhor candidata a solução é atualizada. O algoritmo passo-a-passo é

Passo 1: $\mathbf{x}_{n_{P2}} = \mathbf{x}_o$.

Passo 2: Escolha aleatoriamente um elemento (n_x) do vetor $\mathbf{x}_{n_{P2}}$, $n_x \in [1, N_x]$, $\mathbf{x}_{n_{P2}} \in \mathbb{R}^{N_x}$.

Passo 3: Mude o valor deste elemento aleatoriamente no intervalo entre os valores mínimo e máximo desta variável correspondente $[L_{n_x}^{min}, L_{n_x}^{max}]$

$$\mathbf{x}_{n_{P2}}(n_x) = rand(L_{n_x}^{min}, L_{n_x}^{max}) \quad (8)$$

e calcule a nova função objetivo $EQM(\mathbf{x}_{n_{P2}})$

Passo 4: Se $EQM(\mathbf{x}_{n_{P2}}) < EQM(\mathbf{x}_o)$, então $\mathbf{x}_o = \mathbf{x}_{n_{P2}}$.

Passo 5: Se $n_{P2} = N_{P2}$, pare o algoritmo; caso contrário, $n_{P2} = n_{P2} + 1$ e vá para o Passo 1.

Processo 3: Neste processo, a melhor candidata até o momento (\mathbf{x}_o) terá um de seus elementos aleatoriamente incrementados ou decrementados por um valor fixado (α), o novo valor de função é calculado. Depois deste processo ocorrer N_{P3} vezes, se o menor valor de função objetivo é melhor que a melhor candidata a solução, a melhor candidata é atualizada. O algoritmo passo-a-passo é

Passo 1: $\mathbf{x}_{n_{P3}} = \mathbf{x}_o$.

Passo 2: Escolha aleatoriamente um elemento (n_x) do vetor $\mathbf{x}_{n_{P3}}$, $n_x \in [1, N_x]$, $\mathbf{x}_{n_{P3}} \in \mathbb{R}^{N_x}$.

Passo 3: Mude o valor deste elemento por um valor fixo (α). Se $rand(0, 1) > 0.5$, então $factor = 1$; caso contrário, $factor = -1$ e então

$$\mathbf{x}_{n_{P3}}(n_x) = \mathbf{x}_{n_{P3}}(n_x) + factor \times \alpha \quad (9)$$

e calcule a nova função objetivo $EQM(\mathbf{x}_{n_{P3}})$

Passo 4: Se $EQM(\mathbf{x}_{n_{P3}}) < EQM(\mathbf{x}_o)$, então $\mathbf{x}_o = \mathbf{x}_{n_{P3}}$.

Passo 5: Se $n_{P3} = N_{P3}$, pare o algoritmo; caso contrário, $n_{P3} = n_{P3} + 1$ e vá para o Passo 1.

3.3 Algoritmo Multiestágios Proposto

Um dos problemas encontrados para a resolução do problema de otimização é a definição do número de modos ($N_M + 1$) para serem determinados, que conseqüentemente muda o número de variáveis de busca. Assim, esta pesquisa consiste em estimar os modos eletromecânicos por estágios. No primeiro estágio, os parâmetros de um modo eletromecânico são determinados usando o algoritmo proposto na Seção 3.2. Se o erro quadrático médio encontrado é maior que um limite ϵ ($EQM > \epsilon$), um segundo estágio do algoritmo proposto é executado e agora dois modos eletromecânicos serão estimados com valores iniciais da convergência do último estágio. Desta forma, o algoritmo será executado por N_S estágios até o erro quadrático médio da função objetivo ser alcançado. O algoritmo passo-a-passo é

Passo 1: Defina os parâmetros do Algoritmo Multiestágios (AM) proposto : $N_E, N_I, N_{P1}, N_{P2}, N_{P3}, \alpha, \epsilon, A_{min}, A_{max}, \sigma_{min}, \sigma_{max}, \omega_{min}, \omega_{max}, \phi_{min}, \phi_{max}$.

Passo 2: Execute o algoritmo proposto na Seção 3.2.

Passo 3: Se $EQM < \epsilon$, pare o algoritmo proposto; caso contrário, escolha o modo eletromecânico \mathbf{x}^k em \mathbf{x}_o mais distante do eixo imaginário e duplique para o próximo estágio do algoritmo, ou seja, $\mathbf{x}_o = [\mathbf{x}_o, \mathbf{x}^k]$ e vá para o Passo 2.

Nesta pesquisa, os códigos foram implementados e simulados no *software* MatLab em um máquina com Intel(R) Xeon (R) CPU 2.40 GHz, 64 GB RAM.

4. ESTUDOS DE CASOS E DISCUSSÃO

Estudos de casos são apresentados e discutidos nesta seção para avaliar a aplicação do Algoritmo Multiestágios proposto e apresentado na Seção 3. O primeiro estudo de caso descrito na Seção 4.1 é um sinal sintético onde os parâmetros do sinal tais como amplitude e ângulo do modo de oscilação e o modo de oscilação são conhecidos. O segundo caso descrito na Seção 4.2 avalia o algoritmo proposto para dados reais de PMUs coletados do Sistema de Medição Fasorial Sincronizado Brasileiro do Sistema Interligado Nacional (SIN) Brasileiro (Decker et al. (2011, 2010, 2006); Jeremias et al. (2012)) após a ocorrência de uma contingência real em 2011 onde os parâmetros do sinal não são conhecidos.

4.1 Identificação dos Modos de um Sinal Teste Sintético

O primeiro estudo de caso consiste em determinar os parâmetros modais de um sinal de teste sintético definido por (10) e mostrado na Figura 1. Esta análise também foi feita em Schumacher et al. (2018); Papadopoulos et al. (2016). O sinal sintético definido por (10) é contínuo e para aplicar o método multiestágios proposto este sinal foi discretizado em janela de dados de 0,01 s, ou seja, uma frequência de amostragem de 100 Hz para um tempo total de 30 s.

$$y(t) = 1,00 \cdot e^{-0,1697 \cdot t} \cdot \cos(1,4351 \cdot t - 2,5133) + 1,32 \cdot e^{-0,8150 \cdot t} \cdot \cos(3,9270 \cdot t + 1,8850) + 1,13 \cdot e^{-1,8230 \cdot t} \cdot \cos(6,4654 \cdot t + 0,3142) \quad (10)$$

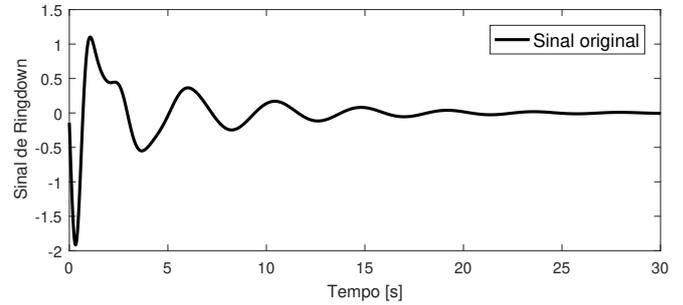


Figura 1. Sinal teste sintético sob estudo.

Da equação (10) e da Tabela 1, é possível notar que o sinal de *ringdown* é composto de 3 modos, então o algoritmo proposto exigiria 3 estágios para sua convergência em um valor de erro baixo (ϵ). O método multiestágios proposto foi executado 100 vezes com os mesmos parâmetros para avaliar os resultados de sua convergência. A Tabela 2 descreve os parâmetros do Algoritmo Multiestágios (AM) proposto para todas as 100 simulações.

Tabela 1. Parâmetros Modais do Sinal Teste Sintético.

| k | A_k | $\sigma_k (s^{-1})$ | $\omega_k (rad/s)$ | $\phi_k (rad)$ |
|-----|-------|---------------------|--------------------|----------------|
| 1 | 1,00 | -0,1697 | 1,4351 | -2,5133 |
| 2 | 1,32 | -0,8150 | 3,9270 | 1,8850 |
| 3 | 1,13 | -1,8230 | 6,4654 | 0,3142 |

Tabela 2. Parâmetros do Algoritmo Multiestágios Proposto.

| Parâmetro | Valor | Parâmetro | Valor |
|------------|----------------|----------------|------------------|
| N_I | 5 | A_{max} | $max(y(t))$ |
| N_E | 1000 | σ_{min} | $-2,5651 s^{-1}$ |
| N_{P1} | 5 | σ_{max} | $0 s^{-1}$ |
| N_{P2} | 5 | ω_{min} | $0 rad/s$ |
| N_{P3} | 5 | ω_{max} | $10 rad/s$ |
| α | 10^{-4} | ϕ_{min} | $-\pi rad$ |
| ϵ | 10^{-6} | ϕ_{max} | πrad |
| A_{min} | $-max(y(t))$ | | |

Após 100 simulações do método proposto, o Algoritmo Multiestágios proposto convergiu com um erro abaixo de $\epsilon = 10^{-8}$ utilizando 3 estágios como era previsto pois o sinal sintético foi construído com três modos. A Tabela 3 fornece os valores mínimo, máximo, médio e desvio padrão dos valores de EQM para cada estágio das 100 execuções do método proposto. Figuras 2, 3 e 4 mostram os modos eletromecânicos estimados para cada estágio das 100 execuções do algoritmo proposto no plano complexo com os modos reais. Figura 5 apresenta uma comparação entre o sinal teste sintético e a resposta de ringdown obtida através do método proposto.

Tabela 3. Valores Obtidos de EQM para 100 execuções do AM.

| Estágio | EQM Mínimo | EQM Máximo | EQM Médio | EQM Desvio Padrão |
|---------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| 1 | 70,7755 | 70,9895 | 70,8114 | 0,0420 |
| 2 | 4,0910 | 4,0928 | 4,0914 | 0,0004 |
| 3 | $4,8 \cdot 10^{-8}$ | $27,5 \cdot 10^{-8}$ | $17,6 \cdot 10^{-8}$ | $4,7 \cdot 10^{-8}$ |

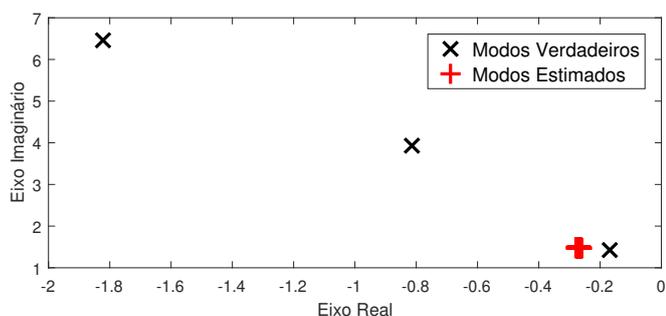


Figura 2. Modos reais e estimados para o estágio 1 para 100 simulações do Algoritmo Multiestágios.

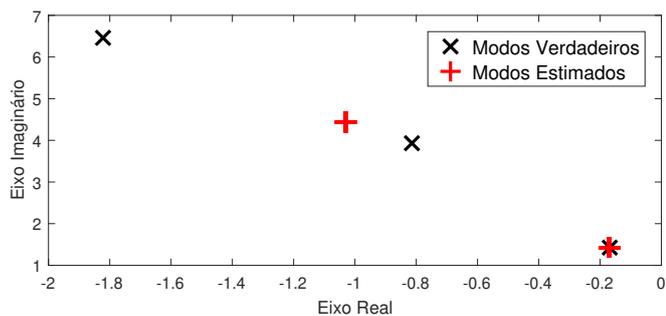


Figura 3. Modos reais e estimados para o estágio 2 para 100 simulações do Algoritmo Multiestágios.

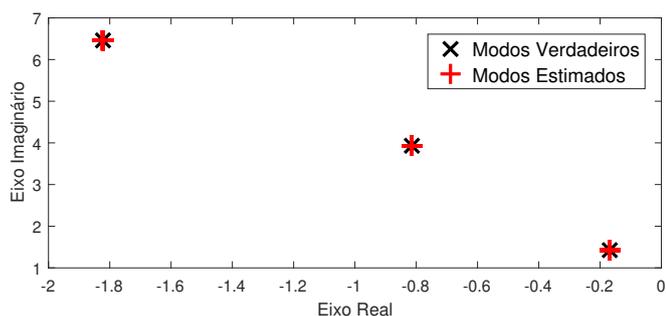


Figura 4. Modos reais e estimados para o estágio 3 para 100 simulações do Algoritmo Multiestágios.

Os resultados do método proposto foram comparados com os resultados de dois diferentes métodos existentes na literatura: Ringdown Frequency-Domain Vector Fitting (RFD-VF) (Papadopoulos et al. (2016)) e Ringdown Time-Domain Vector Fitting (RTD-VF) (Schumacher et al. (2018)). A Tabela 4 fornece o tempo de simulação total para cada método estimar os modos eletromecânicos. Tabela 5 descreve os modos estimados para cada um dos três métodos.

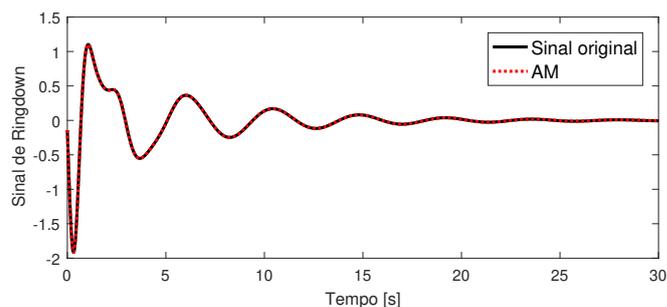


Figura 5. Sinal teste sintético e resposta de *ringdown* obtido pelo Algoritmo Multiestágios.

Tabela 4. Tempo de simulação total de cada método em segundos.

| RFD-VF | RTD-VF | MA |
|----------|----------|----------|
| 838,2981 | 461,7016 | 309,4560 |

Destes resultados alcançados, as seguintes avaliações podem ser feitas

- O algoritmo multiestágios proposto, AM, estimou os parâmetros do sinal sintético com menor erro quadrático médio e tempo total que os métodos RFD-VF e RTD-VF.
- O algoritmo multiestágios proposto corretamente identificou o número de modos eletromecânicos exigidos a serem estimados para o sinal sintético sem o programador definir o número de modos desejados para serem determinados.
- É possível observar pela Figura 5 que o sinal estimado pelo algoritmo multiestágios proposto é bem similar ao sinal original dado pela equação (10).

4.2 Sistema Interconectado Brasileiro

O Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) no Sistema Interligado Nacional (SIN) Brasileiro apresenta atualmente 28 PMUs localizados em diferentes locais no país no sistema de distribuição assim como pode ser visto em MedFasee2021 (2021) e este SMFS Brasileiro registrou o resultado de uma contingência que ocorreu em 2011. Um explosão numa bucha elétrica provocou a desconexão da usina hidrelétrica de Itaipu do resto do SIN em 3 de Setembro de 2011 às 19 hs 43 min e 40,3 s (Decker et al. (2011); Jeremias et al. (2012)) e o Sistema de Medição Fasorial Brasileiro (Decker et al. (2006, 2010)) registrou o comportamento do sistema sob esta contingência. A usina hidrelétrica de Itaipu foi reconectada 27 min 49,7 s depois (Decker et al. (2011); Jeremias et al. (2012)). A desconexão e reconexão deste sistema fez com que as áreas do SIN oscilassem contra as outras variando o componente de corrente contínua.

As medidas elétricas desta contingência foram medidas pelo SMFS Brasileiro cuja central está localizada na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A Figura 6 descreve a resposta de frequência do PMU localizado na UFSC de Santa Catarina onde é possível observar que tal sinal registrado apresenta ruído e um comportamento oscilatório.

Tabela 5. Estimativas dos Parâmetros Modais para o Sinal Teste Sintético.

| Método | k | A_k | σ_k (s^{-1}) | ω_k (rad/s) | ϕ_k (rad) | EQM |
|--------|-----|--------|----------------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|
| RFD-VF | 1 | 0,9960 | -0,1695 | 1,4350 | -2,5057 | $1,4442 \cdot 10^{-2}$ |
| | 2 | 1,3262 | -0,8179 | 3,9251 | 1,8908 | |
| | 3 | 1,1384 | -1,8288 | 6,4503 | 0,3017 | |
| RTD-VF | 1 | 0,9998 | -0,1697 | 1,4351 | -2,5130 | $9,0976 \cdot 10^{-4}$ |
| | 2 | 1,3203 | -0,8171 | 3,9276 | 1,8862 | |
| | 3 | 1,1319 | -1,8243 | 6,4671 | 0,3186 | |
| AM | 1 | 1,0000 | -0,1697 | 1,4351 | -2,5133 | $4,8086 \cdot 10^{-8}$ |
| | 2 | 1,3201 | -0,8150 | 3,9271 | 1,8849 | |
| | 3 | 1,1298 | -1,8228 | 6,4655 | 0,3142 | |

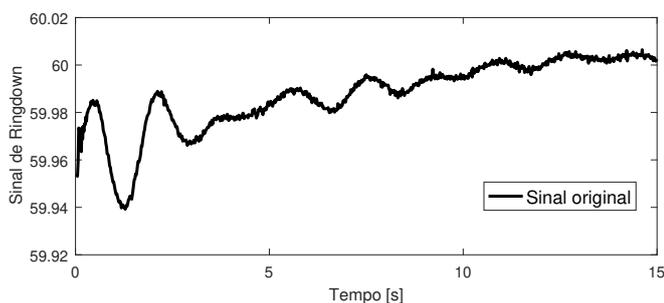


Figura 6. Resposta de ringdown do SIN.

Ao contrário do sinal sintético, o programador não tem conhecimento prévio dos parâmetros modais do sinal descrito pela Figura 6, o que é natural pois este sinal foi medido diretamente de um PMU de um grande sistema de potência composto por vários geradores de energia elétrica, reguladores automáticos de tensão, estabilizadores de sistemas de potência, cargas estáticas e dinâmicas, dentre outros equipamentos que afetam o comportamento dinâmico do sistema de potência. O algoritmo multiestágios proposto foi executado 100 vezes a fim de avaliar os resultados de convergência. A Tabela 2 descreve os parâmetros do Algoritmo Multiestágios proposto para este estudo de caso para todas as 100 simulações.

Após 100 simulações, o método proposto convergiu com um erro abaixo de $\epsilon = 10^{-3}$ utilizando 5 estágios. A Tabela 6 fornece os valores mínimo, máximo, médio e desvio padrão de EQM para cada estágio das 100 simulações do algoritmo proposto.

Tabela 6. Valores obtidos de EQM para 100 simulações do AM.

| Estágio | EQM | EQM | EQM | EQM |
|---------|--------|--------|--------|----------------------|
| | Mínimo | Máximo | Médio | Desvio Padrão |
| 1 | 0,0445 | 0,0446 | 0,0447 | $5,9 \times 10^{-5}$ |
| 2 | 0,0075 | 0,0077 | 0,0078 | $8,8 \times 10^{-5}$ |
| 3 | 0,0038 | 0,0040 | 0,0041 | $8,7 \times 10^{-5}$ |
| 4 | 0,0021 | 0,0022 | 0,0023 | $5,8 \times 10^{-5}$ |
| 5 | 0,0009 | 0,0009 | 0,0010 | $2,9 \times 10^{-5}$ |

Os resultados do algoritmo multiestágios proposto foram comparados com os resultados alcançados de dois outros métodos já existentes na literatura Ringdown Frequency-Domain Vector Fitting (RFD-VF) Papadopoulos et al. (2016) e Ringdown Time-Domain Vector Fitting (RTD-VF) Schumacher et al. (2018). A Tabela 7 fornece o tempo de simulação total para cada método estimar os modos eletromecânicos a partir dos dados discretos do sinal medido. A Tabela 8 descreve os modos estimados para cada um dos três métodos em análise. A Figura 7 apresenta uma comparação entre o sinal real medido pelo PMU do SIN e a resposta de *ringdown* obtida pelo algoritmo multiestágios proposto.

Tabela 7. Tempo de simulação total de cada método em segundos.

| RFD-VF | RTD-VF | AM |
|-----------|----------|----------|
| 1243,0562 | 693,8910 | 321,0519 |

Destes resultados alcançados, as seguintes avaliações podem ser feitas

- O algoritmo multiestágios proposto estimou os parâmetros do sinal de *ringdown* com menor erro e tempo total que os métodos RFD-VF e RTD-VF sendo que o sinal real medido de um PMU brasileiro apresenta ruído e perda de dados.
- Ao contrário do sinal sintético, o sinal real medido de um PMU do SIN sob estudo nesta seção é de um sistema de potência de grande porte que tem milhares de modos e o algoritmo multiestágios foi capaz de identificar os modos principais que compõe o sinal real sob estudo.
- O menor erro quadrático médio alcançado pelas simulações do algoritmo multiestágios proposto foi de $9,5 \times 10^{-4}$ para um número de épocas (NE) fixo em 1000. Assim, a diminuição deste erro pode exigir um maior número de épocas.
- É possível observar pela Figura 7 que o sinal estimado pelo algoritmo multiestágios proposto apresenta similaridade com o sinal original composto por ruídos de medição.

Tabela 8. Estimativas modais do sinal coletado do SIN.

| Método | k | A_k | σ_k | ω_k | ϕ_k | Erro |
|--------|-----|---------|------------|------------|----------|----------------------|
| RFD-VF | 1 | 60,0192 | 0 | 0 | 0 | $7,2 \times 10^{-2}$ |
| | 2 | 0,0152 | -0,3732 | 4,3805 | -2,2510 | |
| | 3 | 0,0139 | -0,1689 | 3,6100 | -1,7233 | |
| | 4 | 0,0090 | -0,1943 | 2,4816 | 0,4906 | |
| | 5 | -0,0484 | -0,1115 | 0 | 0 | |
| RTD-VF | 1 | 60,0179 | 0 | 0 | 0 | $3,2 \times 10^{-3}$ |
| | 2 | 0,0142 | -0,3806 | 4,3544 | -2,2902 | |
| | 3 | 0,0126 | -0,1707 | 3,6371 | -1,6899 | |
| | 4 | 0,0090 | -0,1882 | 2,3425 | 0,4902 | |
| | 5 | -0,0611 | -0,0987 | 0 | 0 | |
| MA | 1 | 60,0123 | 0 | 0 | 0 | $9,5 \times 10^{-4}$ |
| | 2 | -0,0097 | -0,1962 | 2,3661 | -2,7314 | |
| | 3 | -0,0129 | -0,1767 | 3,5805 | 1,5891 | |
| | 4 | -0,0146 | -0,4096 | 4,4371 | 0,5731 | |
| | 5 | -0,0534 | -0,1045 | 0,0574 | -0,0094 | |

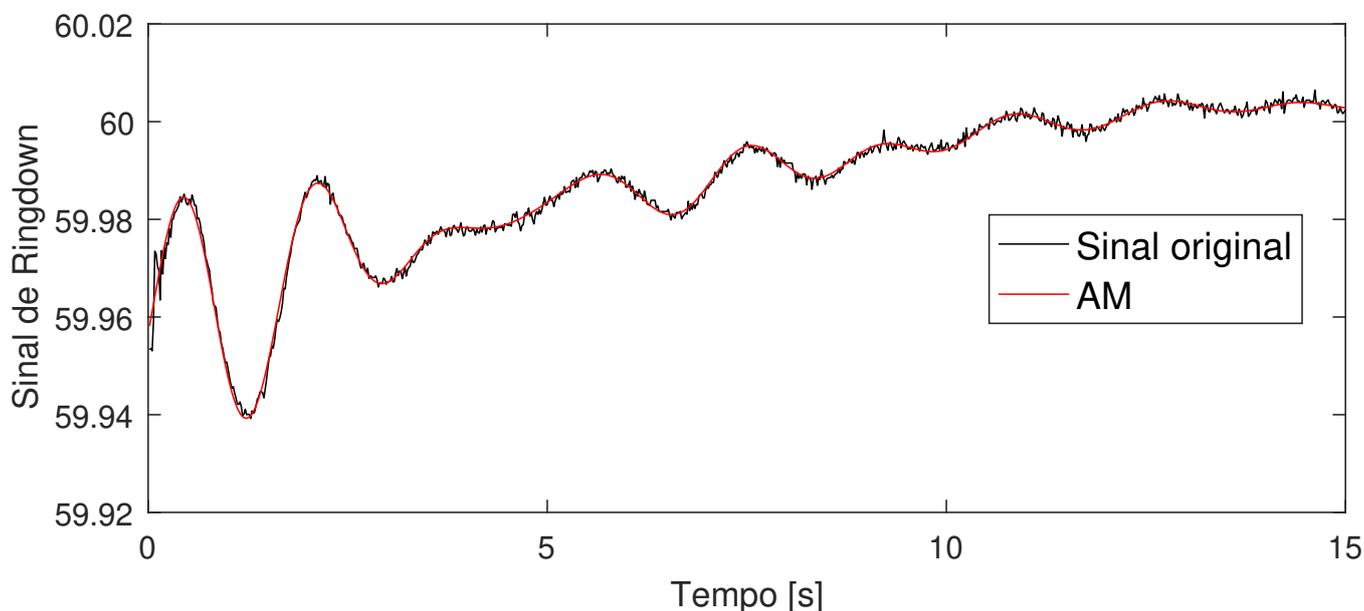


Figura 7. Sinal de PMU do SIN e a resposta de *ringdown* obtida pelo método proposto.

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um novo algoritmo chamado Algoritmo Multiestágios (AM) para estimar os parâmetros modais de um sinal de *ringdown*. Do desenvolvimento e dos resultados alcançados pelo algoritmo multiestágios proposto, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- O algoritmo multiestágios proposto estimou os parâmetros do sinal de *ringdown* com menor erro quadrático médio e menor tempo total em relação aos métodos RFD-VF e RTD-VF já existentes na literatura. Trabalhos futuros em programação paralela podem reduzir ainda mais este tempo de processamento.
- O algoritmo multiestágios proposto corretamente identificou o número de modos exigidos para serem estimados do sinal de *ringdown* sem o programador definir o número desejado de modos a serem estimados. Em sistemas de potência que tem muitos modos

eletromecânicos, ele é essencial para estimar somente os modos que contribuem para o sinal medido e sob análise.

- Os resultados alcançados para um sinal real de PMU composto de ruídos e perdas de alguns dados de um sistema de potência de grande porte mostram a efetividade do algoritmo multiestágios proposto para situações em tempo real de operação de sistemas de potência.

AGRADECIMENTOS

Nós agradecemos aos autores do artigo Jeremias et al. (2012) por compartilhar conosco o conjunto de dados transitórios do sistema MedFasee do Sistema Interconectado Brasileiro.

REFERÊNCIAS

- Bento, M.E.C. (2020). Fixed Low-Order Wide-Area Damping Controller Considering Time Delays and Power System Operation Uncertainties. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(5), 3918–3926.
- Bento, M.E.C. (2022). A method for monitoring the load margin of power systems under load growth variations. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 30, 100677. doi:10.1016/j.segan.2022.100677.
- Bento, M.E.C. and Ramos, R.A. (2021). An approach for monitoring and updating the load margin of power systems in dynamic security assessment. *Electric Power Systems Research*, 198, 107365.
- Crow, M.L. and Singh, A. (2005). The Matrix Pencil for Power System Modal Extraction. *IEEE Trans. Power Syst.*, 20(1), 501–502.
- Decker, I.C., Agostini, M.N., e Silva, A.S., and Dotta, D. (2010). Monitoring of a large scale event in the Brazilian Power System by WAMS. In *2010 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control - VIII (IREP)*, 1–8. IEEE.
- Decker, I.C., Dotta, D., Agostini, M.N., Zimath, S.L., and e Silva, A.S. (2006). Performance of a synchronized phasor measurements system in the Brazilian power system. In *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1–8. IEEE.
- Decker, I.C., e Silva, A.S., Agostini, M.N., Prioste, F.B., Mayer, B.T., and Dotta, D. (2011). Experience and applications of phasor measurements to the Brazilian interconnected power system. *Eur. Trans. Electr. Power*, 21(4), 1557–1573.
- Hauer, J.F., Demeure, C.J., and Scharf, L.L. (1990). Initial results in Prony analysis of power system response signals. *IEEE Trans. Power Syst.*, 5(1), 80–89.
- Jeremias, T., Zimmer, V., Decker, I.C., e Silva, A.S., and Agostini, M.N. (2012). Estudo de oscilações eletromecânicas no sistema elétrico brasileiro utilizando medidas fasoriais sincronizadas. In *XX Congresso Brasileiro de Automatica*, 2364–2371.
- Li, F. and et al. (2010). Smart Transmission Grid: Vision and Framework. *IEEE Trans. Smart Grid*, 1(2), 168–177.
- MedFasee2021 (2021). MedFasee Project - Monitoring of the National Interconnected System in real time. <http://www.medfasee.ufsc.br/brasil/>, Accessed on April 20, 2021.
- Messina, A.R. and Vittal, V. (2007). Extraction of Dynamic Patterns From Wide-Area Measurements Using Empirical Orthogonal Functions. *IEEE Trans. Power Syst.*, 22(2), 682–692.
- Mou, Q., Ye, H., Liu, Y., and Gao, L. (2019). Applications of matrix perturbation theory to delayed cyber-physical power system. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 107, 507–515.
- Papadopoulos, T.A., Chrysochos, A.I., Kontis, E.O., and Papagiannis, G.K. (2016). Ringdown analysis of power systems using vector fitting. *Electr. Power Syst. Res.*, 141, 100–103.
- Philip, J.G. and Jain, T. (2019). An improved Stochastic Subspace Identification based estimation of low frequency modes in power system using synchrophasors. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 109, 495–503.
- Rivas, A.E.L. and Abrao, T. (2020). Faults in smart grid systems: Monitoring, detection and classification. *Electr. Power Syst. Res.*, 189, 106602.
- Rogers, G. (2000). *Power System Oscillations*. Springer US, Boston, MA.
- Schumacher, R., Oliveira, G.H.C., and Kuiava, R. (2018). A novel time-domain linear ringdown method based on vector fitting for estimating electromechanical modes. *Electr. Power Syst. Res.*, 160, 300–307.
- Schumacher, R., Oliveira, G.H.C., and Kuiava, R. (2019). A multi-signal instrumental variable vector fitting method for estimating inter-area electromechanical modes of power systems. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 111, 1–13.
- Ye, H., Gao, W., Mou, Q., and Liu, Y. (2017). Iterative infinitesimal generator discretization-based method for eigen-analysis of large delayed cyber-physical power system. *Electr. Power Syst. Res.*, 143, 389–399.