

## Uma nova aplicação do Método *Vector Fitting* para dados extraídos por PMUs utilizando sinais *probing*

Deborah L. M. Gaertner, Ricardo Schumacher,  
Gustavo H. C. Oliveira

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR 80210-170 BRA (e-mails: [deborah.mgaertner@gmail.com](mailto:deborah.mgaertner@gmail.com); [schumacher.ric@gmail.com](mailto:schumacher.ric@gmail.com); [gustavo.oliveira@ufpr.br](mailto:gustavo.oliveira@ufpr.br))

**Abstract:** Iterative algorithms called Vector Fitting (VF) appear in the power system community as a powerful system identification tool, with successful applications in areas such as modeling frequency-dependent equivalent networks, modeling transmission lines and electrical transformers and passive macromodeling. However, using only output signals, the VF method has only recently been adapted to the context of estimation of oscillatory modes from ringdown data (transients). In this sense, there are two parallel proposals in this work. The first is to present the gains in estimating the damping in oscillatory modes, not only from autonomous measurement of PMU signals, but also with the inclusion of probing signals. The second is to present the application of the Vector Fitting Method for the estimation of oscillatory modes of electrical power systems (SEPs), using the active and reactive powers on the system buses as probing signals, by operating the system in a quasi-stationary regime (ambient data). These two contexts were tested in a well-known 11-bar test system, with four thermal turbines, whose frequency, voltage and active and reactive power data were known. The results obtained through the VF method were compared with those obtained through the Yule Walker method. The results obtained showed the ability of the VF algorithm to generate models whose outputs satisfactorily approximate the measured data. The electromechanical poles obtained through the simulations were validated through the poles obtained from the computer program PacDyn for dynamic stability analysis in power systems.

**Resumo:** Os algoritmos iterativos denominados *Vector Fitting* (VF) 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, modelagem de linhas de transmissão e transformadores elétricos e macromodelagem passiva. 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* (transitórios). Nesse sentido, existem duas propostas paralelas neste trabalho. A primeira é apresentar os ganhos na estimação do amortecimento de modos oscilatórios, não somente da medição autônoma dos sinais de PMU, mas também da inclusão de sinais *probing*. A segunda é apresentar a aplicação do Método *Vector Fitting* para a estimação de modos oscilatórios de sistemas elétricos de potência (SEPs), utilizando como sinais *probing* as potências ativa e reativa nos barramentos do sistema, mediante operação do sistema em regime quase-estacionário (dados ambiente). Estes dois contextos foram testados em um conhecido sistema teste de 11 barras, com quatro turbinas térmicas, cujos dados de frequência, tensão e potências ativa e reativa eram conhecidos. Os resultados obtidos através do método VF foram comparados com os obtidos através do método *Yule Walker*. Os resultados obtidos mostraram a capacidade do algoritmo VF em gerar modelos cujas saídas aproximam-se satisfatoriamente dos dados medidos. Os polos eletromecânicos obtidos através das simulações foram validados através dos polos obtidos a partir do programa computacional PacDyn de análise de estabilidade dinâmica em sistemas de potência.

**Keywords:** Estimation; phasor measurements; power system modeling; power system monitoring; system identification; Wide Area Measurement System (WAMS); Vector Fitting (VF).

**Palavras-chaves:** Estimação, medições fasoriais; modelagem de sistemas de energia, monitoramento de sistemas de energia; identificação de sistemas, Wide Area Measurement System (WAMS); Vector Fitting (VF).

### 1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a operação de sistemas de energia tem sido desafiada pelas margens de estabilidade, como apresentado em Aminifar et al. (2015). Ter um sistema de medição de área

ampla (WAMS - *Wide Area Monitoring System*) permite obter dados detalhados sobre o modo de operação do sistema de energia tanto em um estado estacionário como em transitórios. As PMUs (*phasor measurement unit*) são indispensáveis no Sistema Elétrico de Potência (SEP) para a implementação da

tecnologia de WAMS, para melhorar o monitoramento dinâmico e a capacidade analítica do sistema de energia para o centro de despacho. A rápida adaptação desses dispositivos e tecnologias fez com que os pesquisadores buscassem oportunidades nas aplicações diversas de PMUs e de WAMS sob a perspectiva do SEP. Em Aminifar et al. (2015), as pesquisas estão direcionadas para a aplicação de dados de PMUs, de forma a estimar os modos eletromecânicos dominantes de um SEP, permitindo inferir acerca de sua estabilidade.

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, segundo Ramos (2002). Na segunda, tais modos podem ser calculados a partir de técnicas de estimação modal a partir da medição de parâmetros elétricos. Utilizando, por exemplo, sinais de frequência de operação ou de defasagem angular de tensão extraídos por meio de PMUs esses métodos são capazes de determinar o amortecimento das oscilações eletromecânicas dominantes do sistema. Isso significa que, através desses dados, é possível estimar os modos eletromecânicos do SEP e monitorar sua estabilidade.

O objetivo da análise através destes métodos é determinar o amortecimento das oscilações eletromecânicas do sistema utilizando dados de frequência e tensão capturados por meio de PMUs. Através desses dados é possível estimar os modos eletromecânicos do SEP. Frequentemente, a estimação do amortecimento de modos oscilatórios é realizada através da medição autônoma dos sinais de PMUs (como frequência de operação, defasagens angulares de tensão nas barras, etc). Em outras palavras, geralmente nenhum sinal externo de teste (*probing*) é considerado como aplicado ao sistema.

Em muitos casos, a medição autônoma dos sinais de PMU pode não ser suficiente para a devida estimação de modos eletromecânicos. 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, sendo tomado como uma entrada do mesmo, enquanto as medições de frequência e tensão permanecem como saídas do sistema. Um exemplo desta estratégia é apresentado em Thambirajah et al. (2010).

Usando essa estratégia e com o intuito de facilitar a obtenção de informações sobre o amortecimento do sistema, foi explorada em Zhou et al. (2006) a estimação dos modos eletromecânicos de um SEP através do algoritmo N4SID (*numerical algorithms for subspace state space system identification*). Já em Dosiek et al. (2013b), foi apresentado o método 2SLS (*two-stage least squares algorithm*) que assim como o algoritmo N4SID, 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, foi

proposto em Zhou et al. (2008) um método robusto, regularizado e recursivo dos mínimos quadrados, o método R3LS. De forma similar, o algoritmo RML (*recursive maximum likelihood estimator*) apresentado em Dosiek et al. (2013a), demonstrou ser um método capaz de estimar modos eletromecânicos em tempo real e rastrear mudanças no sistema.

Sob uma perspectiva mais ampla, sabe-se que os algoritmos iterativos denominados *Vector Fitting* (VF), apresentados em Grivet-Talocia et al. (2016), demonstram ser 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*, como apresentado em Papadopoulos et al. (2016), Schumacher et al. (2018) e Schumacher et al. (2019).

Nesse sentido, existem duas propostas paralelas neste trabalho. A primeira é apresentar os ganhos na estimação do amortecimento de modos oscilatórios pela inclusão de sinais *probing* juntamente com a medição autônoma dos sinais de PMU. A segunda é apresentar a aplicação do Método VF para este contexto, isto é, a estimação de modos oscilatórios de SEPs, utilizando como sinais *probing* as potências ativa e reativa nos barramentos do sistema, mediante operação do sistema em regime quase-estacionário (dados ambiente). Estes dois contextos foram testados em um conhecido sistema teste, cujos dados de frequência, tensão e potências ativa e reativa são conhecidos. Para esse caso, os modos eletromecânicos obtidos são comparados com os obtidos pelo método *Yule Walker*, apresentado em Zhang et al. (1992).

O conteúdo abordado nesse artigo está estruturado da seguinte maneira. A seção 2 define o problema envolvido. A seção 3 descreve o método VF com dados de entrada e saída. Na seção 4, o método VF é aplicado em um sistema multi-máquinas, considerando dados de potência ativa como entrada do sistema. A seção 5 apresenta os resultados das simulações e a seção 6, a conclusão do artigo e são indicados os trabalhos futuros.

## 2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

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:

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}}(t) &= A\underline{x}(t) + B_L\underline{q}(t) + B_E\underline{u}_E(t) \\ \underline{y}(t) &= C\underline{x}(t) + D_L\underline{q}(t) + D_E\underline{u}_E(t) + \underline{\mu}(t)\end{aligned}\quad (1)$$

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 do gerador.  $t$  é 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 entrada exógeno  $\underline{u}_E$ . 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 1, 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.

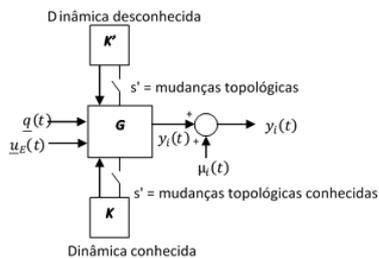


Fig. 1 Modelo para dinâmica de sistema de potência - Baseado em Pierre et al. (2012)

A resposta do sistema na Figura 1 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. 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 do ambiente subjacente. Dessa forma, o problema que se apresenta aqui é a estimação dos autovalores do sistema (1), baseado nas medições de  $\underline{u}_E$  e  $\underline{y}$ , de modo que os modos eletromecânicos possam ser classificados.

### 3. MÉTODO VECTOR FITTING

Apresentado em Schumacher et al. 2018, o método *Vector Fitting* no Domínio do Tempo (VF-RTD), 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

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

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 amostra (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

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

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 poucas 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  $\sigma(s)$ :

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

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

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  $\{\bar{p}_i\} \rightarrow \text{eig}(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C})$ ).

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 VF padrão lidam com esse problema aproximando sequências  $\{\tilde{y}_i(kT)\}$  e  $\{\tilde{u}_i(kT)\}$  a partir de técnicas numéricas de integração.

No 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 VF 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 *Vector Fitting* no Domínio do Tempo 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  $\tilde{y}(t) = [\tilde{y}_1(t) \dots \tilde{y}_N(t)]^T$  e  $\tilde{u}(t) = [\tilde{u}_1(t) \dots \tilde{u}_N(t)]^T$ .

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.

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

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

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

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

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

A discretização em espaço de estados em (15) fornece um caminho fácil para simular  $\tilde{y}[k]$  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:

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

Porém, utilizando a discretização de espaço-estado também é possível garantir que as funções parciais de resíduos  $c_i$  e  $c_{i+1}$  são 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 VF no domínio da frequência. Como pode ser observado na equação 19, essa substituição tem o efeito de que os resíduos correspondentes no vetor de solução  $\theta$  tornam-se iguais a  $\text{Re}(c_1)$  e  $\text{Im}(c_1)$ .

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{s-\bar{p}_i} & \frac{1}{s-\bar{p}_i^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_i \\ c_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s-\bar{p}_i} + \frac{1}{s-\bar{p}_i^*} & \frac{j}{s-\bar{p}_i} - \frac{j}{s-\bar{p}_i^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Re}(c_1) \\ \text{Im}(c_1) \end{bmatrix} \quad (19)$$

#### 4. APLICAÇÃO DO MÉTODO VF EM UM SISTEMA CONHECIDO

Para validação do método VF empregando sinal *probing* e dados ambiente, foram realizadas simulações considerando um sistema elétrico multi-máquinas, apresentado em Kundur (1994), composto por 11 barras com 4 turbinas térmicas conforme Figura 2. 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.

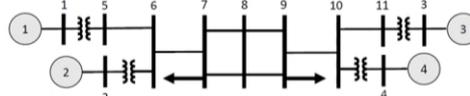


Fig. 2 Sistema de 11 barras com 4 turbinas térmicas

As simulações computacionais do sistema teste foram realizadas com o auxílio dos programas ANATEM, ANAREDE e Pacdyn, sendo considerado como sinal *probing* uma variação da carga do sistema para representar o comportamento aleatório das cargas nas redes de distribuição que resultam em uma resposta ambiente do sistema teste. Primeiramente, foram realizadas simulações variando a potência ativa apenas da barra 7 e, posteriormente, somente a potência ativa da barra 9. Para esses testes, foi observado o efeito na frequência e tensão das respectivas barras. Foi utilizada uma taxa de amostragem de 0,01 segundo, totalizando 60000 medições em cada simulação. Essas simulações foram realizadas tanto para o caso do sistema mais carregado, quanto para o caso do sistema menos carregado.

Após obter os dados através das simulações, um algoritmo do método VF foi programado, utilizando ordem do modelo igual a 6. Inicialmente, foi utilizada como entrada a variação de potência ativa da barra 7 e como saída a frequência e a tensão

na barra 7. Em seguida, foi realizado o mesmo teste para a barra 9, ou seja, foi utilizada a variação de potência ativa da barra 9 como entrada e como saída foi a frequência e tensão na barra 9. Nos dois casos, para evitar distorções na estimação de modos eletromecânicos, foram desconsideradas as primeiras 1000 medições. Através da Transformada Rápida de Fourier, observando os sinais obtidos no domínio da frequência, foi verificado que os sinais deveriam ser filtrados por um filtro passa baixa, de forma a atenuar a amplitude das frequências maiores que o limite compatível com os modos eletromecânicos tornar sua estimação mais precisa.

### 5. RESULTADOS

Na seção 5.1, são apresentados os resultados da aplicação do método VF para a estimação dos modos eletromecânicos do sistema descrito na seção 4. Também será apresentada na seção 5.2 uma análise comparativa entre os resultados obtidos pelo método VF com aqueles obtidos pelo software Pacdyn e pelo método YW. Nesse ponto, vale ressaltar que o método *Yule Walker* se diferencia do método *Vector Fitting* pela sua característica de não utilizar sinais de entrada, ou seja, este método se baseia apenas nos sinais de saída do modelo. Com isso, é possível comparar a precisão obtida entre um método que usa sinais de entrada (VF) e em um método que não utiliza sinais de entrada (YW).

#### 5.1 Resultados da Aplicação do Método Vector Fitting

Aplicando o método VF para a estimação dos modos eletromecânicos do sistema composto por 11 barras, descrito na seção 4, foi considerado um nível mais elevado de carga. Assumindo a configuração ( $P_{barra\ 7} = 1111W, Q_{barra\ 7} = 115\ VAR, P_{barra\ 9} = 1608W, Q_{barra\ 9} = 440\ VAR$ ), foi variada a potência ativa da barra 7 do sistema no *software* Anatem e foram coletados sinais de frequência e tensão na barra 7. Os dados de potência ativa foram utilizados como dados de entrada no algoritmo do método VF. Na Figura 4 são apresentadas a entrada (potência ativa) e as saídas, frequência e tensão, comparando a saída estimada com a medida.

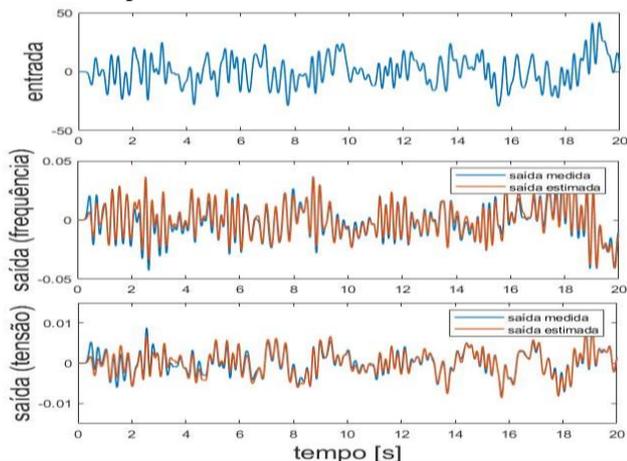


Fig. 4 Entrada medida (Potência Ativa) e Saídas Medidas e Estimadas (Frequência e Tensão)

Para verificar a acurácia entre a saída medida e a 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  $1,5214 \times 10^{-7}$ .

A mesma simulação foi realizada, para um nível inferior de carga ( $P_{barra\ 7} = 967W, Q_{barra\ 7} = 100\ VAR, P_{barra\ 9} = 1200W, Q_{barra\ 9} = 100\ VAR$ ), porém desta vez variando apenas a potência ativa da barra de carga 9. Na Figura 5 são apresentadas a entrada (potência ativa) e as saídas, frequência e tensão, comparando a saída estimada com a medida.

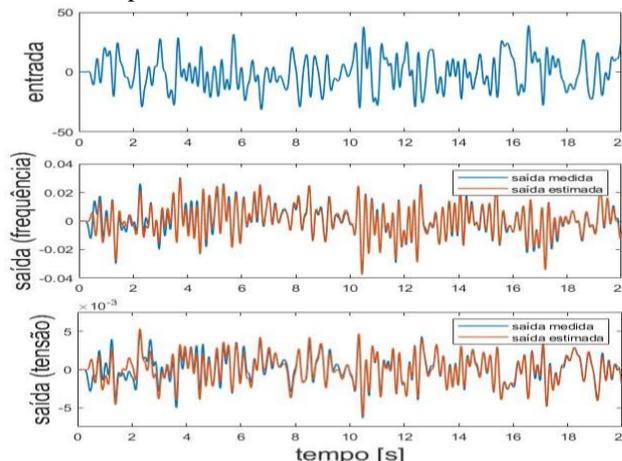


Fig. 5 Entrada medida (Potência Ativa) e Saídas Medidas e Estimadas (Frequência e Tensão)

Novamente, para verificar a acurácia entre a saída medida e a 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  $5,9820 \times 10^{-8}$ .

Nas Figuras 4 e 5 é apresentada apenas uma janela dos resultados obtidos para uma melhor visualização. É possível verificar que a estimação de modos oscilatórios para os sinais de saída de frequência e tensão, através do método VF, apresentou valores de MSE relativamente próximos de zero. Isso indica que o método VF, utilizando um sinal de teste (*probing*), é capaz de estimar os modos eletromecânicos de maneira satisfatória.

#### 5.2 Validação dos Resultados obtidos através do Método VF

Analisando os casos simulados no software Pacdyn, foi possível obter os modos eletromecânicos do sistema que são apresentados na Tabela 1. Também são apresentados os modos eletromecânicos do sistema obtidos através das simulações realizadas utilizando o método *Vector Fitting* e o método *Yule Walker*. O fator de amortecimento desses polos também é apresentado.

Tabela 1. Polos eletromecânicos obtidos através das simulações no Matlab e do programa Pacdyn

Polos Eletromecânicos	Sistema mais carregado	Sistema menos carregado
PacDyn	$-0.1674 \pm 2.7099i$ $\xi = 6.1656\%$	$-0.2532 \pm 3.9628i$ $\xi = 6.3764\%$
Método <i>Vector Fitting</i>	$-0.1212 \pm 3.3296i$ $\xi = 3.6377\%$	$-0.2941 \pm 4.1338i$ $\xi = 7.0966\%$
Método <i>Yule Walker</i>	$-0.3570 \pm 2.4530i$ $\xi = 14.4019\%$	$-0.3942 \pm 2.4529i$ $\xi = 15.9948\%$

Os polos eletromecânicos obtidos a partir das simulações do método VF demonstraram estar relativamente próximos dos polos obtidos através do programa Pacdyn e também apresentaram uma melhor aproximação em relação à taxa de amortecimento, quando comparado com o método YW. Ou seja, observou-se que a estimação realizada via método VF, que utiliza sinal de teste (*probing*) apresentou maior capacidade de gerar estimativas mais próximas àquelas obtidas via PacDyn do que o método YW, o qual não utiliza o sinal de teste (*probing*). Isto pode ser observado através dos dados apresentados na Tabela 1.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo explorou a identificação de modos de um sistema de energia através do uso de sinais de sondagem (*probing*) como entrada para o algoritmo do método VF. A potência ativa foi considerada como sinal *probing* nesse algoritmo, sendo possível utilizar dados ambiente, para estimar dados de tensão e frequência do sistema multi-máquinas de 11 barras considerado. Os resultados obtidos mostram a capacidade do algoritmo em gerar modelos cujas saídas aproximam-se satisfatoriamente dos dados medidos, demonstrando o potencial de identificação do sistema de energia usando sinais de sondagem. Os polos eletromecânicos obtidos através das simulações foram validados através dos polos obtidos a partir do programa computacional PacDyn de análise de estabilidade dinâmica em sistemas de potência. Mais testes devem ser realizados para aprimorar a metodologia utilizada neste artigo, sobretudo, no que diz respeito à análise de sinais provenientes das PMUs. Trabalhos futuros investigarão o uso de sistemas com múltiplas entradas e saídas, permitindo, assim, tornar os resultados obtidos mais precisos e também a aplicação desse algoritmo em sistemas de grande porte.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- Aminifar, F., Fotuhi-Firuzabad, M., Safdarian, A., Davoudi, A., and Shahidehpour, M. (2015). Synchronphasor measurement technology in power systems: panorama and state-of-the-art. *IEEE Access*, 2, 1607–1628.
- Dosiek, L., Pierre, J.W., Follum, J. (2013a). A Recursive Maximum Likelihood Estimator for the Online Estimation of Electromechanical Modes with Error Bounds. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28 (1), 441–451.
- Dosiek, L., Pierre, J.W. (2013b). Estimating Electromechanical Modes and Mode Shapes Using the Multichannel ARMAX Model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28 (2), 1950–1959.
- Grivet-Talocia, S., Gustavsen, B. (2016). *Passive Macromodeling: Theory and Applications*, John Wiley and Sons Inc.
- Gustavsen, B., Semlyen, A. (1999). Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 14 (3), 1052–1061.
- Gustavsen, B. (2004). Wide band modeling of power transformers. *IEEE Trans. PowerDeliv.*, 19 (1), 414–422.
- Gustavsen, B. (2006). Improving the pole relocating properties of vector fitting, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 21 (3), 1587–1591.
- Ihlenfeld, L.P.R.K., Oliveira, G.H.C., Sans, M.R. (2016). A data passivity-enforcement preprocessing approach to multiport system modeling, *IEEE Trans. PowerDeliv.*, 31 (3), 1351–1359.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York.
- Oliveira, G.H.C., Rodier, C., Ihlenfeld, L.P.R.K. (2016). LMI-based method for estimating passive blackbox models in power systems transient analysis, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 31 (1), 3–10.
- Pierre, J.W., Trudnowski, D.J., Donnelly, M.K., Zhou, N., Tuffner, F.K., Dosiek, L. (2012) Overview of System Identification for Power Systems from Measured Responses\*. *16th IFAC Symposium on System Identification The International Federation of Automatic Control*, 989–1000.
- Ramirez, A. (2009). Vector fitting-based calculation of frequency-dependent network equivalents by frequency partitioning and model-order reduction. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 24 (1), 410–415.
- Ramos, R.A. (2002). Procedimento de Projeto de Controladores Robustos para o Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas de Potência, Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Elétrica e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, Cap. 3.
- Rogers, G. (2000). *Power System Oscillations*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Schumacher, R., Oliveira, G.H.C. (2017). An optimal vector fitting method forestimating frequency-dependent network equivalents in power systems. *Electr. Power Syst. Res.* 150, 96–104.
- Schumacher, R., Oliveira, G.H.C., Kuiava, R. (2018). A novel time-domain linear ringdown method based on vector fitting for estimating electromechanical modes. *Electrical Power Systems Research*, 160, 300-307.
- Schumacher, R., Oliveira, G.H.C., Kuiava, R. (2019). A multi-signal instrumental variable vector fitting method for estimating inter-area electromechanical modes of power systems. *Electrical Power and Energy Systems*, 111, 1-13.
- Thambirajah, J., Barocio, E., Thornhill, N.F. (2010). Comparative review of methods for stability monitoring in electrical power systems and vibrating structures, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 4 (10), 1086–1103.
- Ubolli, A., Gustavsen, B. (2011). Comparison of methods for rational approximation of simulated time-domain responses: ARMA, ZD-VF, and TD-VF. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 26 (1), 279–288.
- Zhang, H. M., Duhamel, P., On the Methods for Solving Yule-Walker Equations. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 40, n. 12, 2987–3000.
- Zhou, N., Pierre, J.W., Hauer, J.F. (2006) Initial Results in Power System Identification from Injected Probing Signals Using a Subspace Method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21 (3), 1296–1302.
- Zhou, N., Trudnowski, D.J., Pierre, J.W., Mittelstadt, W.A. (2008). Electromechanical Mode Online Estimation Using Regularized Robust RLS Methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23 (4), 1670–1680.