



## Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT

### Validação do algoritmo de estimação de estados aplicados a análise de estabilidade dinâmica com o cálculo de autovalores do programa PACDyn

ZULMAR SOARES MACHADO JUNIOR(1); GABRIEL DE VASCONCELOS ENG(1);  
UNIFEI(1);

#### RESUMO

O aumento do monitoramento das grandezas elétricas como forma de prevenção contra oscilações e perfis instáveis de regime implica no aumento de dados a serem analisados. Na atualidade, sistemas de potência em operação estão passando por evolução na medida em que novas tecnologias são agregadas e passam a influenciar na dinâmica da rede já existente. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia a ser aplicada para avaliar a estabilidade angular às pequenas oscilações, conhecida como Decomposição em Modos Dinâmicos. Esta será comparada com o Método Prony, que é tradicionalmente conhecida por estimar autovalores de sistemas dinâmicos. Para realização dos testes, são considerados dois casos para simulação e, em cada um, são realizadas comparações entre seus desempenhos em relação aos resultados obtidos por meio do programa computacional PacDyn. Para os testes será utilizado um sistema equivalente Sul-Sudeste-MatoGrosso de 107 barras.

#### PALAVRAS-CHAVE

Decomposição em Modos Dinâmicos, Estabilidade Dinâmica, Método de Prony.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Sistemas de potência podem ser submetidos a situações que promovam o surgimento de pequenas oscilações, provocadas pelo rápido desbalanço entre o fornecimento e consumo de energia elétrica. Tradicionalmente o sentido do fluxo de potência é unidirecional, das usinas para as cidades, por meio das linhas de transmissão dispostas pelo território. Entretanto, em face as novas tecnologias e propostas de geração intermitente de energia, há uma tendência em integrar estas características com a rede elétrica, obtendo o que se conhece como redes inteligentes, ou smart grids.

O aumento da disponibilidade de geração garantirá aos consumidores maior confiabilidade sobre a energia elétrica, podendo até mesmo obter reduções nos preços de tarifas. Por outro lado, a instalação e operação de equipamentos oriundos das novas tecnologias requer maior atenção quanto a injeção de harmônicos na rede e consequente piora na qualidade de energia [1]. Ademais, nos dias atuais, as companhias de energia vêm investindo cada vez mais no monitoramento de grandezas elétricas de forma a ter dados mais precisos através das unidades de medição fasorial, ou *Phasor Measurement Units* (PMUs).

Sabe-se que há benefícios para o sistema no que diz respeito ao uso de PMUs instaladas para monitorar as oscilações de baixa frequência em grandes sistemas de potência, havendo já demonstrado resultados satisfatórios, gerando grandes quantidades de dados para análise. Entretanto, a busca por algoritmos que possam interpretar estes valores e informações a respeito da estabilidade para auxiliar na elaboração de projetos de controladores mais robustos, tem sido alvo de estudos e pesquisas [2]-[5].

O método de Prony é a ferramenta tradicional na análise de sinais em sistemas de potência [6], tendo seu desempenho avaliado inclusive em ambientes com PMUs [7]-[10]. Entretanto, o método em sua formulação tradicional possui algumas desvantagens, tais como: a análise de somente um sinal de cada vez e a necessidade de estimar previamente a ordem do sistema; o que pode agregar mais erros numéricos sobre a estimação. Trabalhos para propor técnicas automáticas para essa tarefa foram propostos [7], assim como versões alternativas para a metodologia funcionar com múltiplos sinais em operação simultânea [10].

Na medida que os estudos foram sendo realizados, pesquisadores propuseram a utilização de ferramentas de mecânica dos fluidos para analisar problemas elétricos, como no caso da Decomposição em Modos Dinâmicos (DMD) [11]-[13]. Este método de estimação de autovalores permite considerar diversos sinais simultaneamente, desde que os dados coletados tenham sido uniformemente amostrados com o mesmo período de amostragem.

Outras contribuições no que diz respeito ao DMD, é que foram propostas modificações na metodologia que permitiram ao algoritmo trabalhar melhor com sinais poluídos por ruídos [14], além de implementações computacionais baseadas em problemas de otimização [15]-[17], ou mesmo alterações na rotina de otimização para incluir a promoção de esparsidade e capturar com mais facilidade os modos que apresentam as maiores contribuições a respeito da dinâmica do sistema [18]-[19].

Em relação aos avanços realizados na área de modelagem de sistemas utilizando sinais, este trabalho tem como objetivo realizar uma validação do método DMD aplicados na análise de estabilidade à pequenos sinais em um sistema equivalente Sul-Sudeste-MatoGrosso. Para tanto, os resultados do DMD serão comparados com um o tradicional método de Prony e validado com o cálculo de autovalores obtidos a partir do programa computacional PacDyn de análise de estabilidade dinâmica em sistemas de potência.

Sendo assim, o texto está dividido da seguinte forma: na segunda e terceira seções têm-se o desenvolvimento matemático dos métodos de Prony e DMD; a quarta seção apresenta os resultados da comparativos e de validação, subdividida nos dois casos estudados e, na quinta seção, a conclusão e desenvolvimentos futuros.

## 2.0 - MÉTODO DE PRONY

O método de Prony permite estimar a frequência, o amortecimento, amplitude e o ângulo de fase relativo das componentes modais de um sinal [8]. Então, considere um sistema dinâmico linear e invariante no tempo, o qual recebe como entrada uma função impulso em  $t = t_0$ , tal que gera uma condição inicial para a variável de estado  $x(t_0) = x_0$ . Logo, no instante que o sinal aplicado na entrada é retirado, e considerando que não existam entradas subsequentes [6], a dinâmica do sistema oscilará até o novo estado seguindo a modelagem apresentada em (1).

$$\dot{x}_{n \times 1} = A_{n \times n} x_{n \times 1} \quad (1)$$

Em (1),  $x$  é o vetor dos “ $n$ ” estados do sistema dinâmico. A solução de (1) é a resposta no tempo para o sistema dinâmico, a qual pode ser vista em (2).

$$y(t) = \sum_{i=1}^n c_i \exp(\lambda_i t) = \sum_{i=1}^n z_i \quad (2)$$

Em (2),  $\lambda_i$  é o  $i$ -ésimo autovalor pertencente ao domínio dos números complexos. Na prática, as equações que modelam o comportamento do sistema não são conhecidas, sendo necessário amostrar a cada  $\Delta t$  (unidades de tempo) um ponto de  $y(t)$ , resultando em (3).

$$y[k] = y(k\Delta t) = \sum_{i=1}^n z_i^k, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

A proposta da análise de Prony consiste em reconstruir o sinal amostrado em (3) por um modelo de predição linear como o apresentado em (4).

$$\hat{y}[n+k] = \hat{a}_1 y[n-1+k] + \hat{a}_2 y[n-2+k] + \dots + \hat{a}_n y[k] \quad (4)$$

Expandindo esse modelo para todas as “ $N$ ” amostras realizadas no sinal, têm-se a formulação matricial (5) do problema de predição linear.

$$\begin{bmatrix} y[n] & y[n-1] & \dots & y[1] \\ y[n+1] & y[n] & \dots & y[2] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y[N-1] & y[N-2] & \dots & y[N-n] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \vdots \\ \hat{a}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y[n+1] \\ y[n+2] \\ \vdots \\ y[N] \end{bmatrix} \quad (5)$$

A solução de (5) resulta nos coeficientes do polinômio característico descrito por (6), o qual contém a informação sobre os autovalores discretos do sistema.

$$\hat{z}^n - \hat{a}_1 \hat{z}^{n-1} - \hat{a}_2 \hat{z}^{n-2} - \dots - \hat{a}_n \hat{z}^0 = 0 \quad (6)$$

Conhecidas as raízes discretas que satisfazem (6) é necessário convertê-las para o domínio do tempo contínuo, aplicando (7), para que seja possível estimar os parâmetros do sinal reconstruído.

$$\hat{\lambda}_i = \ln(\hat{z}_i) / \Delta t \quad (7)$$

Portanto, a resolução de (5), (6) e (7), determinará uma estimativa para os pólos do sistema dinâmico via método de Prony.

### 3.0 - DECOMPOSIÇÃO EM MODOS DINÂMICOS

A decomposição em modos dinâmicos (DMD) é um método de identificação modal a qual permite analisar um conjunto de sinais simultaneamente, como já mencionado anteriormente, desde que estes tenham sido uniformemente amostrados à cada  $\Delta t$  (unidades de tempo) [5]. Considerando um conjunto de “ $M$ ” sinais, cada um contendo  $N+1$  amostras, dispostas na matriz  $Y$  descrita em (8).

$$Y = \begin{bmatrix} [y_0 & y_1 & \dots & y_i & \dots & y_{N-1}]_1 \\ [y_0 & y_1 & \dots & y_i & \dots & y_{N-1}]_2 \\ \vdots \\ [y_0 & y_1 & \dots & y_i & \dots & y_{N-1}]_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

Em (8),  $y_i$  é a  $i$ -ésima amostra do sinal a ser analisado. Em seguida, considere separar  $Y$  em duas matrizes, ambas possuindo “ $M$ ” linhas e “ $N$ ” colunas, como apresentadas em (9) e (10).

$$Y_{0_{M \times N}} = \begin{bmatrix} [y_0 & y_1 & \dots & y_i & \dots & y_{N-1}]_1 \\ [y_0 & y_1 & \dots & y_i & \dots & y_{N-1}]_2 \\ \vdots \\ [y_0 & y_1 & \dots & y_i & \dots & y_{N-1}]_M \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Y_{1_{M \times N}} = \begin{bmatrix} [y_1 & y_2 & \dots & y_i & \dots & y_N]_1 \\ [y_1 & y_2 & \dots & y_i & \dots & y_N]_2 \\ \vdots \\ [y_1 & y_2 & \dots & y_i & \dots & y_N]_M \end{bmatrix} \quad (10)$$

Assumindo que exista uma matriz de mapeamento linear e constante, a qual contém a informação sobre a dinâmica do sistema [1], logo, (9) e (10) podem ser relacionadas da forma como apresentado em (11), na obtenção da matriz  $A$ .

$$Y_{1_{M \times N}} \approx A_{M \times M} Y_{0_{M \times N}} \quad (11)$$

Em ambientes onde há uma grande quantidade de dados a serem analisados com o DMD, aplicar diretamente a decomposição em autovalores e autovetores da matriz  $A$  pode exigir muito processamento computacional e comprometer a precisão dos resultados [13]. A alternativa encontrada para reduzir esse gasto consiste em aproximar a matriz de mapeamento utilizando a decomposição em valores singulares de  $Y_0$ , descrita em (12).

$$Y_{0_{M \times N}} = U_{M \times M} \Sigma_{M \times N} (V_{N \times N})^T \quad (12)$$

Em (12),  $U$  é uma matriz ortonormal contendo os autovetores singulares à esquerda,  $V^T$  é também uma matriz ortonormal para os autovetores singulares à direita, e  $\Sigma$  a matriz diagonal com os “ $N$ ” valores singulares  $\{\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n \dots \sigma_N\}$ . A matriz  $\Sigma$  pode também ser constituída de autovalores numéricos, ainda mais se as medições apresentarem ruído. Neste trabalho foi considerado uma tolerância  $\varepsilon$  para a razão entre os valores singulares, de forma que  $\sigma_n$  dividido por  $\sigma_1$  determinará o limite superior máximo permitido para a ordem do sistema, esta abordagem auxilia na determinação da ordem do sistema.

Considerando a ordem “ $n$ ” (com  $n < N$ ) e realizando a substituição de (12) em (11), têm-se uma formulação alternativa para  $Y_1$  em (13).

$$Y_{1_{M \times N}} = A_{M \times M} U_{M \times n} \Sigma_{n \times n} (V_{N \times n})^T \quad (13)$$

Isolando a matriz de mapeamento em (13), e sabendo que a inversa das matrizes de autovetores à direita e à esquerda são calculadas por meio da transposição de seus elementos, obtém-se uma aproximação para  $A$ , apresentada em (14).

$$A_{M \times M} = Y_{1_{M \times N}} V_{N \times n} (\Sigma_{n \times n})^{-1} (U_{M \times n})^T \quad (14)$$

Finalmente, a aproximação desejada para a matriz de mapeamento, chamada de  $\tilde{A}$ , pode ser determinada ao multiplicar à esquerda por  $U^T$ , e a direita por  $U$ , onde o produto matricial  $U^T U$  é igual a uma matriz identidade de ordem “ $n$ ”. Esta operação é considerada como uma implementação robusta, pois relaciona o DMD com uma outra técnica de identificação de autovalores, conhecida como decomposição ortogonal própria (POD). A relação entre as metodologias DMD e POD é descrita em [13], e apresentada como em (15).

$$\tilde{A}_{n \times n} = (U_{M \times n})^T Y_{1_{M \times N}} V_{N \times n} (\Sigma_{n \times n})^{-1} \quad (15)$$

A decomposição em autovalores e autovetores de  $\tilde{A}$  resultarão nos modos discretos do sistema, os quais podem ser convertidos para seus correspondentes de tempo contínuo utilizando (7). Sendo assim, toda a decomposição em modos dinâmicos pode obtida por meio das relações (8)-(15).

#### 4.0 - RESULTADOS NO SISTEMA TESTE

A validação e a comparação dos resultados serão realizados em um sistema de potência equivalente, que está dividido em três subsistemas denominados de Sul, Sudeste e Mato Grosso, com capacidade total de geração de 22.080 MW e possuindo uma carga total de 12.679 MW. O subsistema Sudeste concentra a maior capacidade de geração; cerca de 56% de toda a geração disponível no sistema, os dados do mesmo podem ser obtidos em [20]. A Fig. 1 ilustra a topologia elétrica do sistema de potência estudado, o qual pode-se verificar que este sistema possui grandes corredores radiais de interligação entre as áreas, o que lhe confere características peculiares.

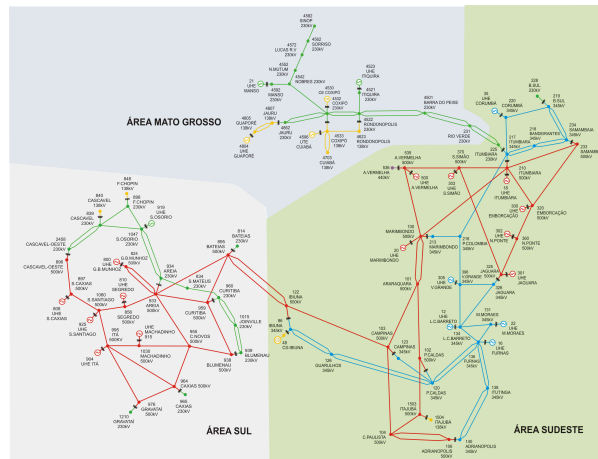


FIGURA 1 – Sistema de Potência Equivalente de 107 Barras

A análise da estabilidade angular para pequenos sinais consiste em promover variações de pequena amplitude no entorno do ponto de operação do sistema. Sobre estas condições, é possível realizar a linearização das equações diferenciais, obtendo informação a respeito dos autovalores. Se todos estes autovalores possuírem parte real negativa, haverá garantia sobre a estabilidade do sistema [21]-[22]. Entretanto, para se realizar uma comparação da estimação em cada metodologia utilizou-se do programa PacDyn [23] que permite análise da estabilidade dinâmica, o qual calculou a matriz característica do espaço de estados, resultando em 499 autovalores no ponto de operação do sistema obtido a partir dos dados.

Estes 499 autovalores serão utilizados como referência para a comparação das metodologias de Prony e DMD. O programa computacional PacDyn pode determinar além dos autovalores, toda a representação no espaço de estados do sistema dinâmico, assim como apresentado em (16), permitindo fácil importação das matrizes de estado para o ambiente Matlab.

Pela figura 2 é possível verificar que os sinais de entrada considerados para a obtenção dos resultados foram a potência de referência ( $P_{Ref}$ ), a tensão de referência do regulador de tensão ( $V_{Ref}$ ) e a potência mecânica ( $P_m$ ) das máquinas síncronas do sistema. Além disto, foram consideradas como sinais de saída, o deslocamento angular ( $\delta$ ), a velocidade angular ( $\omega$ ) e a tensão de campo ( $E_{fd}$ ) das máquinas síncronas. Para testar a robustez dos métodos, considerou se também um ruído a fim de verificar o quão robusto por ser o algoritmo de estimação na determinação dos autovalores.

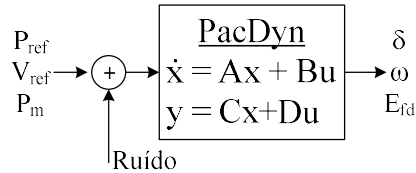


FIGURA 2 – Sinais de Entrada e Saídas do Sistema 107 barras

Conhecido o sistema dinâmico (16), o objetivo estabelecido para os casos deste artigo serão aplicar no sistema dinâmico funções de entrada pré-determinadas, obtendo como sinais de saída as curvas em  $\delta$ ,  $\omega$  e  $E_{fd}$  que serão utilizadas e analisadas pelos métodos de Prony e DMD, para realizar a estimação. Assim, vale ressaltar que as metodologias empregadas não possuem qualquer conhecimento sobre a representação no espaço de estados calculado pelo PacDyn. A tabela 1 apresenta as máquinas síncronas do sistema cujas sinais de entrada e saída foram escolhidas para que o programa PacDyn determinasse a realização no espaço de estado como apresentado em (16).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (16)$$

Tabela 1 – Máquinas Participantes pelos Sinais de Entrada e Saída

No Barra	Nome	No Barra	Nome
12	LCBARRET (4GR)	303	S.SIMAO (4GR)
16	FURNAS (5GR)	305	V.GRANDE (4GR)
18	ITUMBIAR (6GR)	500	A.VERMEL (4GR)
20	MARIMBON (5GR)	800	GBMUNHOZ (2GR)
21	MANSO (3GR)	808	SCAXIAS (4GR)
22	M.MOR.A (3GR)	810	SSEGREGO (4GR)
35	CORUMBA (2GR)	904	ITA (4GR)
300	EMBORCAC(3GR)	915	MACHADIN (2GR)
301	JAGUARA (4GR)	919	SOSOR1A4 (4GR)
302	N.PONTE (3GR)	925	SSANTIAG (3GR)

#### 4.1 Caso 1 – Aplicação do impulso na entrada

Neste caso, foi considerado como sinais de entrada ao sistema, apresentado na Fig 2, a função de impulso unitário, o que pela combinação entre entradas e saídas resultou em 3600 curvas, tendo estas sido amostradas em 2000 pontos distribuídos uniformemente no intervalo de tempo de 30 segundos. Na Fig. 3, no lado direito, são apresentados exemplos de algumas das 3600 curvas que seriam respostas do sistema dinâmico ao impulso unitário.

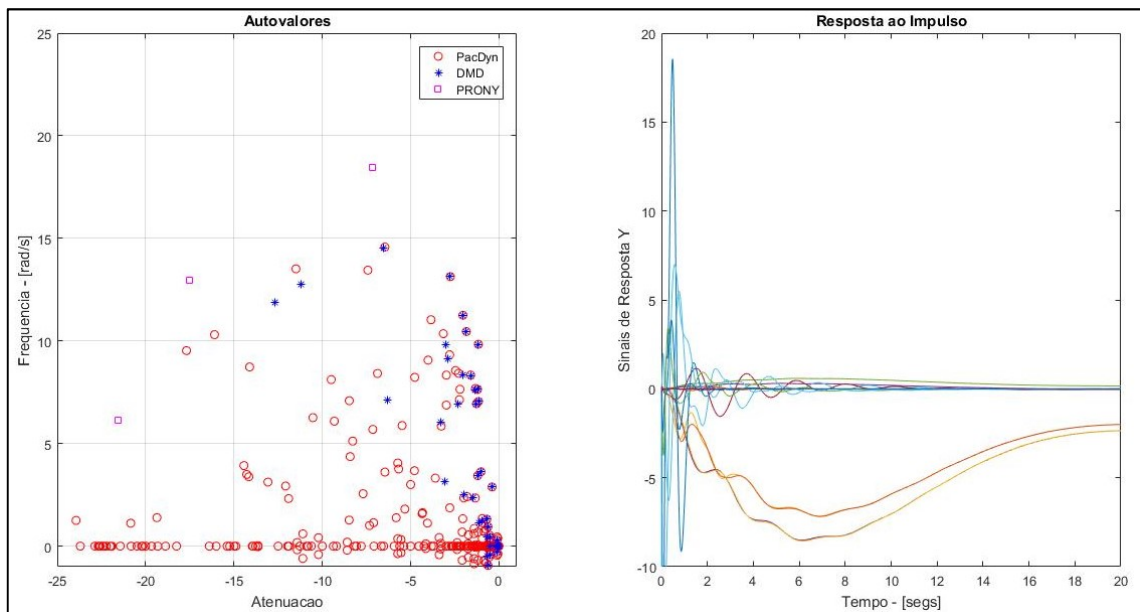


FIGURA 3 – Autovalores e Resposta ao Impulso Sem Considerar Ruídos

O método prony necessita de uma estimativa para ordem do polinômio discreto, por outro lado, o método DMD necessita que seja estipulado uma tolerância para o cálculo dos valores singulares. Estes são parâmetros dos algoritmos que podem variar conforme a dinâmica de cada sistema de potência. Contudo, considerado o elevado número de curvas para se realizar a estimação e o grande esforço computacional das técnicas a serem empregadas, foi observado que as estimativas mais precisas ocorreram ao adotar ordem igual à 20 para o Prony, e tolerância para valores singulares igual à  $1.0E-6$  no método DMD.

Então, os resultados estimados pelas metodologias e é possível destacar que o DMD foi aplicado em uma única simulação, o qual estimou 81 autovalores, dos quais estes serão comparados com os 499 autovalores calculados pelo PacDyn. Entretanto, para o método de Prony, foi necessário executar o algoritmo por 3600 vezes, cada uma respectiva a uma combinação de entrada e saída do sistema. Após as simulações com o método de Prony foram calculados aproximadamente 72 mil autovalores, sendo que 20 eram possíveis de comparação com os autovalores calculados pelo PacDyn.

O lado esquerdo da Fig. 3 apresenta a comparação entre os conjuntos estimados de autovalores com os calculados via PacDyn. A ênfase dada para Fig. 3 apresenta com maior detalhe, os modos com menores coeficientes de amortecimento do sistema de potência, onde é possível observar que os autovalores com menos amortecimento foram capturados pelo DMD, uma vez que estes praticamente coincidem com os autovalores do PacDyn, porém, o método Prony não obteve sucesso na estimação dos estados.

Sendo assim, para melhorar o entendimento sobre a comparação e validação dos autovalores estimados são apresentados os 10 modos dinâmicos com os menores valores de amortecimento do sistema, tanto os calculados via PacDyn, quanto os valores estimados. Estes valores estão apresentados na Tabela 1, no qual é possível ver que as colunas da tabela de amortecimento tanto calculado pelo PacDyn quanto o determinado pelas estimativas do DMD estão muito próximos. Já, a estimação realizada pelo Prony apresenta autovalores instáveis.

Tabela 1 – Modos de Menor Amortecimento - Caso Sem Ruído

PacDyn <sup>§</sup>			DMD		Prony	
Fator Participação	Autovalores	$\zeta$ [%]*	Autovalores	$\zeta$ [%]	Autovalores	$\zeta$ [%]
22 DELT	-1.1673 ± 9.8371i	11.7836	-1.1674 ± 9.8371i	11.7848	10.60 ± 6.02i	-86.9761
300 DELT	-0.3942 ± 2.8831i	13.5472	-0.3942 ± 2.8831i	13.5472	3.81 ± 15.12i	-24.4321
919 WW	-1.2168 ± 7.6362i	15.7361	-1.2142 ± 7.6491i	15.6777	-4.01 ± 209.33i	1.9139
915 WW	-1.1636 ± 7.0457i	16.2940	-1.1585 ± 7.0500i	16.2158	-3.96 ± 178.39i	2.2201
178 CDU	-0.0631 ± 0.3773i	16.4893	-1.8498 ± 10.4632i	17.4089	-3.83 ± 144.79i	2.6419
16 DELT	-1.3357 ± 7.6829i	17.1288	-1.3497 ± 7.5853i	17.5187	-7.18 ± 18.44i	36.2905
35 DELT	-1.8467 ± 10.4576i	17.3901	-2.0436 ± 11.2515i	17.8705	-63.49 ± 81.01i	61.6870
925 WW	-2.0432 ± 11.2520i	17.8664	-1.2759 ± 6.9342i	18.0963	-17.54 ± 12.95i	80.4415
12 DELT	-1.2740 ± 6.9443i	18.0453	-1.5844 ± 8.2942i	18.7635	-43.90 ± 19.93i	91.0554
18 DELT	-1.6066 ± 8.3367i	18.9230	-2.7562 ± 13.1300i	20.5442	-21.54 ± 6.15i	96.1537

<sup>§</sup> As siglas DELT e WW representam sinais de deslocamento angular e velocidade do rotor no PacDyn.

\*  $\zeta$ [%] – coeficiente de amortecimento associado ao autovalor;

Com estes resultados é possível verificar que este estudo analisou o conjunto de autovalores calculados em dois tipos de métodos de estimação, e observou-se que a estimação realizada via DMD apresentou boa capacidade em obter os mesmos modos eletromecânicos calculados via PacDyn, fato que pode ser observado tanto pela Fig. 3, quanto pela Tabela 1.

Entretanto, tomando como medida de referência, o cálculo do desvio padrão associado ao erro entre a estimação realizada pelo DMD e o cálculo do PacDyn, apresentados na Tabela 1, obteve-se o valor de 3.9779. Este valor de desvio pode ser considerado elevado, uma vez que, uma boa precisão requereria que o desvio padrão fosse muito pequeno tendendo a um valor próximo de zero. Por outro lado, é possível notar que o maior erro na estimação dos autovalores pelo DMD está na existência do fator de participação associado a um controle de PSS de uma das máquinas de Itumbiara, e que este não consegue estimar com precisão o modo. Se forem considerados apenas os fatores de participação em DELT e WW, o desvio padrão diminui ficando igual a 2.2016, o qual significa uma redução de aproximadamente 45%.

Esta característica se deve, principalmente, a decomposição em valores singulares, a qual ordena os elementos conforme sua participação modal, de forma decrescente. Portanto, ao ser realizado o teste de tolerância na matriz diagonal ( $\Sigma$ ), os elementos que mais influenciaram o comportamento do sistema serão prontamente capturados, promovendo um filtro sobre os valores singulares e, conseqüentemente, reduzindo a quantidade de autovalores

numéricos estimados e possível não capturado daqueles modos cujas malhas de controle não foram ativas. Uma alternativa para isto seria incluir como elementos de análise malhas de estabilização, o qual permitiria ao método DMD capturar tais dinâmicas.

#### 4.2 Caso 2 – Ruído nas medições

Neste caso será considerado o sistema dinâmico com as mesmas configurações de entrada e saída descritas no primeiro caso, entretanto, a diferença está na presença de ruído nas medições que serão introduzidas nos sinais de entrada do sistema dinâmico para realização da estimação, assim como apresentado na Fig 2.

O objetivo deste caso é avaliar a robustez dos métodos em aplicações práticas. Para tanto, o ruído estabelecido para as medições será mais severo do que poderia aqueles observados como admissíveis nos equipamentos em operação. O ruído gaussiano que é aquele que possui média nula terá amplitude de 20% do valor máximo respectivo à cada curva mensurada, todas atenuando os sinais amostrados em 10 [dB]. O lado direito da Fig. 4 apresenta o exemplo da distorção causada pelo ruído aplicado sobre as mesmas respostas do sistema que foram usadas no caso 1 (ver lado direito da Fig. 3).

Considerando a metodologia do caso anterior, o método de Prony estimou 20 autovalores. O DMD estimou 82 autovalores. O lado esquerdo da Fig. 4 apresenta a comparação entre os conjuntos estimados de autovalores com os que foram calculados via PacDyn.

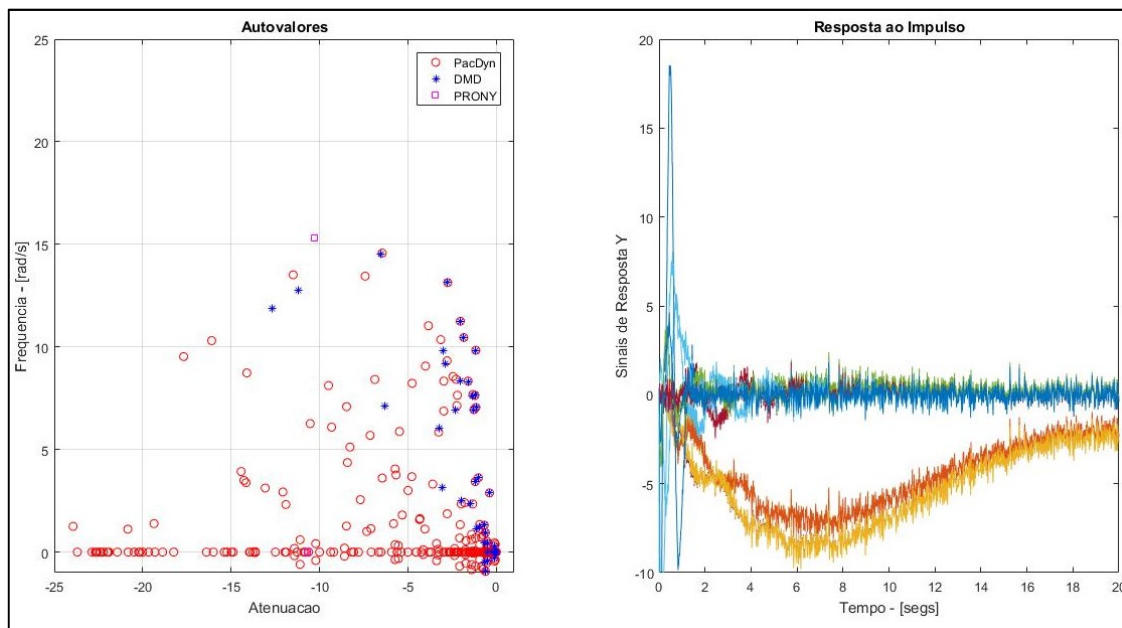


FIGURA 4 – Autovalores e Resposta ao Impulso Considerando Ruídos

Tabela 2 – Modos de Menor Amortecimento - Caso Com Ruído

Fator Participação	PacDyn <sup>§</sup>		DMD		Prony	
	Autovalores	$\zeta$ [%] <sup>*</sup>	Autovalores	$\zeta$ [%]	Autovalores	$\zeta$ [%]
22 DELT	-1.1673 ± 9.8371i	11.7836	-1.1674 ± 9.8371i	11.7847	-15.20 ± 200.07i	7.5778
300 DELT	-0.3942 ± 2.8831i	13.5472	-0.3942 ± 2.8831i	13.5472	-14.89 ± 178.06i	8.3346
919 WW	-1.2168 ± 7.6362i	15.7361	-1.2144 ± 7.6489i	15.6797	-13.54 ± 156.06i	8.6435
915 WW	-1.1636 ± 7.0457i	16.2940	-1.1586 ± 7.0501i	16.2161	-14.89 ± 130.96i	11.3000
178 CDU	-0.0631 ± 0.3773i	16.4893	-1.8498 ± 10.4632i	17.4088	-9.66 ± 74.44i	12.8656
16 DELT	-1.3357 ± 7.6829i	17.1288	-1.3498 ± 7.5849i	17.5204	-14.11 ± 101.18i	13.8101
35 DELT	-1.8467 ± 10.4576i	17.3901	-2.0436 ± 11.2515i	17.8704	-9.14 ± 49.59i	18.1286
925 WW	-2.0432 ± 11.2520i	17.8664	-1.2758 ± 6.9343i	18.0952	-27.32 ± 114.32i	23.2464
12 DELT	-1.2740 ± 6.9443i	18.0453	-1.5843 ± 8.2942i	18.7621	-10.28 ± 15.29i	55.8010
18 DELT	-1.6066 ± 8.3367i	18.9230	-2.7563 ± 13.1300i	20.5442	-10.70 ± 0.00i	100.0000

<sup>§</sup> As nomenclaturas DELT e WW representam sinais de deslocamento angular e velocidade do rotor no PacDyn.

\*  $\zeta$ [%] – coeficiente de amortecimento associado ao autovalor

O DMD estimou de forma satisfatória os modos eletromecânicos do sistema, enquanto que o Prony não obteve êxito em identificar ao menos 1 par de autovalores com os calculados pelo PacDyn. O motivo apontado para a piora da qualidade dos resultados no Prony está relacionado com a dificuldade em estimar previamente a ordem dos sinais em análise, e também o alto custo computacional. Ademais, neste caso, foi introduzido ruído nas medições para avaliar os métodos.

Novamente, tomando o cálculo do desvio padrão associado ao erro entre a estimação realizada pelo DMD e o cálculo do PacDyn, apresentados na tabela 2, obteve-se o valor de 3.9779, que é igual ao desvio padrão obtido para o caso 1 (sem ruído). Assim, é possível verificar no lado direito da Fig 4 que o nível de ruído foi significativo, entretanto, o DMD parece não sofrer interferência na estimação mesmo diante de sinais que apresentam ruídos.

## 5.0 - CONCLUSÕES

Este artigo analisou uma metodologia para avaliação da estabilidade angular a pequenos sinais, baseada em uma Decomposição em Modos Dinâmicos (DMD), o qual é possível observar que este apresentou estimativas satisfatórias para capturar a dinâmica do sistema 107 barras.

O DMD apresentou uma desejável capacidade em estimar autovalores distintos com parte real e imaginária muito próximas ao PacDyn, assim como a correta identificação de autovalores coerentes com a estabilidade do caso estudado, uma vez que, os autovalores de menor amortecimento foram capturados com boa precisão.

Além disto, DMD apresentou resultados satisfatórios mesmo quando os sinais de medição possam apresentar algum tipo de ruído. Sendo assim, este método pode se destacar por apresentar também bons resultados em aplicações quando houver ruído, tais como nas aplicações com sincrofasores.

Uma característica importante do DMD está no fato de possuir baixo custo computacional, podendo ser aplicado em situações em que não são necessárias o cálculo de todos os autovalores, e, também, onde a precisão não for tão requerida. Vale ressaltar que, nos resultados, o DMD capturou os modos eletromecânicos de menor amortecimento com excelente precisão.

Maiores testes devem ser realizados para aprimorar a metodologia utilizada neste trabalho, sobretudo, no que diz respeito à análise de sinais pertencentes ao domínio dos números complexos, provenientes das PMUs. Além disto, pretende-se melhorar a implementação do método Prony para tratamento de sistemas com múltiplas entradas e saídas, permitindo, assim, sua melhor comparação com o método DMD apresentado neste trabalho.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) A. E. Saldaña, E. Barocio, A. R. Messina, J. J. Ramos, R. J. Segundo and G. A. Tinajero, "Monitoring harmonic distortion in microgrids using dynamic mode decomposition," 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, 2017, pp. 1-5.
- (2) E. Barocio, B. C. Pal, N. F. Thornhill and A. R. Messina, "A dynamic mode decomposition framework for global power system oscillation analysis," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 6, pp. 2902-2912, Nov. 2015.
- (3) J. F. Hauer, D. J. Trudnowski and J. G. DeSteese, "A perspective on WAMS analysis tools for tracking of oscillatory dynamics," 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, 2007, pp. 1-10.
- (4) Power System Dynamic Performance Committee, Task Force on Identification of Electromechanical Modes J. J. Sanchez-Gasca, Chair, "Identification of electromechanical modes in power systems," IEEE/PES, Special Publication TP462, Jun. 2012.
- (5) S. Mohapatra and T. J. Overbye, "Fast modal identification, monitoring, and visualization for large-scale power systems using dynamic mode decomposition," 2016 Power Systems Computation Conference (PSCC), Genoa, 2016, pp. 1-7.
- (6) J. F. Hauer, C. J. Demeure and L. L. Scharf, "Initial results in prony analysis of power system response signals," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, no. 1, pp. 80-89, Feb. 1990.
- (7) N. Zhou, J. Pierre and D. Trudnowski, "A stepwise regression method for estimating dominant electromechanical modes," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-1.
- (8) N. Zhou, J. Pierre and D. Trudnowski, "Some considerations in using prony analysis to estimate electromechanical modes," 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, 2013, pp. 1-5.
- (9) F. Z. Khan, R. Nagaraja and H. P. Khincha, "Improved fault location computation using prony analysis for short duration fault," 2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC), Guwahati, 2014, pp. 1-5.

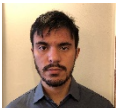


- (10) C. A. Ordonez, H. R. Chamorro, J. Quintero, R. Leelaruij, J. C. Peng and L. Nordström, "Prony-based on-line oscillation detection with real PMU information," 2016 IEEE Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA), Bogota, 2016, pp. 1-5.
- (11) G. V. Eng, "*Análise de Estabilidade Angular Utilizando Métodos de Estimação de Amortecimento no Sistema Elétrico de Potência*". 2019. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Itajubá
- (12) P. Schmid and J. Sesterhenn, "Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data," Bulletin of the American Physical Society, vol. 53, Nov. 2008.
- (13) P. J. Schmid, "Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data," Journal of Fluid Mechanics, vol. 656, pp. 5–28, Jul. 2010.
- (14) S. T. M. Dawson, M. S. Hemati, M. O. Williams, C. W. Rowley, "Characterizing and correcting for the effect of sensor noise in the dynamic mode decomposition," Experiments in Fluids, vol. 57, no. 3, pp. 42, Feb. 2016.
- (15) S. Wang and X. Qing, "Nuclear norm regularised dynamic mode decomposition," in IET Signal Processing, vol. 10, no. 6, pp. 626-632, Aug. 2016.
- (16) P. Héas and C. Herzet, "Optimal low-rank dynamic mode decomposition," 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), New Orleans, LA, 2017, pp. 4456-4460.
- (17) N. Takeishi, Y. Kawahara and T. Yairi, "Sparse nonnegative dynamic mode decomposition," 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Beijing, 2017, pp. 2682-2686.
- (18) M. R. Jovanović, P. J. Schmid, and J. W. Nichols, "Sparsity-promoting dynamic mode decomposition," Physics of Fluids (1994-present), vol. 26, no. 2, p. 024103, 2014.
- (19) J. Annoni, P. Seiler and M. R. Jovanović, "Sparsity-promoting dynamic mode decomposition for systems with inputs," 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), Las Vegas, NV, 2016, pp. 6506-6511.
- (20) W. F. Alves, site "<http://www.sistemas-teste.com.br/>" acessado em 29 de abril de 2019.
- (21) M. A. Pai, Energy Function Analysis for Power System Stability. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA: 1989.
- (22) K. Ogata, Engenharia de Controle Moderno, 4th ed. Prentice-Hall, São Paulo: 2003.
- (23) Eletrobras CEPEL, "PacDyn 9.8.3 - User's Manual", CEPEL/DRE - Departamento de Redes Elétricas, 2017.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Z.S. MACHADO JUNIOR** é graduado em Engenharia Elétrica pela UFJF (1996), Mestre em Engenharia de Sistemas e Computação (2001) e Doutor em Engenharia Elétrica (2005), ambos pela COPPE-UFRJ. Atualmente, é Professor Associado do Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Coordenador do Curso de Especialização em Sistemas Elétricos, Coordenador do Grupo de Engenharia de Sistemas na UNIFEI e IEEE Member.



**G.V. ENG** é Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (2016), e Mestre em Engenharia Elétrica também pela UNIFEI (2019).