

# Aplicação de Diagramas de Estabilização para a Identificação de Dinâmicas Oscilatórias Eletromecânicas a partir da Estimação Modal em Sinais de $\mu$ PMU's

Eduardo Zibetti dos Passos\*, Roman Kuiava\*, Gustavo Henrique da Costa Oliveira\* André Pedretti\*\*

\*Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná

\*\*Copel Distribuição S.A, Curitiba, Paraná

Emails: edu\_zp@hortmail.com, kuiava.gustavo@eletrica.ufpr.br, andre.pedretti@copel.com

**Abstract:** Monitoring the low-frequency electromechanical modes in generation and transmission systems by using signal processing methods, phase measurement units (PMUs) are a reality in actual electric power system. Acknowledging the majority of operating PMU are located in low voltage distribution networks, it is expected that such equipment can also be used to monitor the electromechanical modes associated with distributed generation (DG). This paper, presents an application of N4SID algorithm on ambient data for estimation of DG electromechanical mode. A need for use of these methods of modal estimation is the classification between real modes (with electromechanical meaning) and spurious modes (without physical meaning). An adaptation of the Stabilization Diagram technique is proposed here for this task, which is still little used in power systems, however, which provides an easy and intuitive graphic analysis of the real modes present in the system. In order to validate the proposed technique, two sets of data are used, one from computer simulations of a distribution test system with RED, and another set consisting of real data collected from  $\mu$ PMU's that monitor a mini-network located at the Federal University of Paraná (UFPR). The stabilization diagram proved to be efficient in the classification of real and spurious modes, both for monitoring the electromechanical modes of G&T systems and for distribution systems with RED.

**Resumo:** O monitoramento dos modos eletromecânicos de baixa frequência em sistemas de geração e transmissão (G&T) por processamento de sinais com unidades de medição fasorial (PMUs) é uma realidade nos sistemas elétricos atuais. Sendo a maioria das PMUs em operação localizadas em redes de distribuição de baixa tensão, espera-se que as mesmas também sejam utilizadas para monitorar modos eletromecânicos associados à recursos energéticos distribuídos (RED) presentes nessa rede. Este artigo aplica o algoritmo N4SID para estimar modos eletromecânicos em dados ambiente. Uma necessidade na utilização desses métodos de estimação modal é a classificação entre modos reais (com significado eletromecânico) e modos espúrios (sem significado físico). Propõem-se aqui uma adaptação da técnica de Diagrama de Estabilização para essa tarefa, ainda pouco aplicada em sistemas de potência, porém, que fornece uma análise gráfica fácil e intuitiva dos modos reais presentes no sistema. Visando validar a técnica proposta, são utilizados dois conjuntos de dados, um proveniente de simulações computacionais de um sistema teste de distribuição com RED, e outro conjunto constituído por dados reais coletados de  $\mu$ PMU's que monitoram uma minirrede localizada na Universidade Federal do Paraná (UFPR). O diagrama de estabilização se mostrou eficiente na classificação dos modos reais e espúrios, tanto para o monitoramento dos modos eletromecânicos de sistemas de G&T quanto para sistemas de distribuição com RED.

**Keywords:** Electromechanical modes; Distribution System; Ambient Operation; Distributed Generation; Stabilization Diagram.

**Palavras-chaves:** Modos Eletromecânicos; Sistema de Distribuição; Operação Ambiente; Geração Distribuída; Diagrama de Estabilização.

## 1. INTRODUÇÃO

A transição de redes de distribuição passivas para redes de distribuição ativas, devido a presença de Geração Distribuída (GD), também conhecida por recursos energéticos distribuídos (RED), tem se mostrado uma tendência nos modernos sistemas de energia. Como consequência, estudos apontam que as oscilações eletromecânicas de baixa frequência, antes restritas aos sistemas de geração e transmissão, podem se tornar cada vez mais presentes e relevantes com o aumento de geradores síncronos em redes de distribuição (Kuiava et al. 2008).

Apesar da estimação de modos eletromecânicos em sistemas de geração e transmissão ser um assunto bastante debatido na literatura, a estimação dos modos eletromecânicos ainda precisa ser melhor analisada em sistemas de distribuição com a inserção de GD/RED (Salim et al. 2011).

Sistemas de distribuição com inserção de GD/RED possuem características que podem influenciar na dinâmica desses modos eletromecânicos (Kuiava et al. 2008). Por exemplo, pode-se citar a presença de geradores de menor porte, com potência e inércia menores quando comparados aos sistemas

de geração e transmissão. Além disso, redes de distribuição apresentam uma topologia predominantemente radial e com condutores com resistência maior que linhas de transmissão de alta tensão.

Os modos eletromecânicos estão imersos no comportamento de certas variáveis da rede, como frequência, defasagem angular entre tensões de barra, amplitude de tensão, dentre outras. A coleta de dados ambientes na forma de fasores de tensão e corrente, sincronizados no tempo através de equipamentos conhecidos por  $\mu$ PMU's, (*micro Phasor Measurements Unit's*), impulsionou o desenvolvimento de métodos de decomposição modal para a estimação desses modos eletromecânicos (Leandro R, e Silva A, Decker I 2015). Destaca-se aqui o termo 'u' associado a PMU, que trata de equipamentos de medição fasorial sincronizada própria para aplicações em redes de distribuição (Meier, 2014).

O monitoramento dessas oscilações eletromecânicas a partir de dados ambientes coletados por  $\mu$ PMU's traz vantagens em relação a análise realizada através de modelos conceituais do sistema (ou seja, de modelos do tipo caixa branca). Isso se deve pela dificuldade de se obter a real topologia da rede e os modelos de equipamentos e máquinas presentes, além da dificuldade de se determinar seu ponto de operação, devido as constantes variações de carga (Trudnowski; Pierre 2009). Porém, a utilização desses métodos para identificação de modos eletromecânicos, baseados em teorias de sistemas lineares e de análise estatística, não é uma tarefa trivial devido, dentre outros fatores, ao comportamento não linear inerente dos sistemas elétricos (Leandro R, e Silva A, Decker I 2015).

Uma das limitações na utilização dos métodos de decomposição modal está no aparecimento de modos espúrios dentre o conjunto de modos estimados. Estes modos são assim chamados por estarem presentes na representação matemática do modelo estimado, porém não tem significado físico (Leandro R, e Silva A, Decker I, 2015). Neste sentido, o diagrama de estabilização é uma ferramenta gráfica que pode auxiliar na classificação dos modos identificados entre modos espúrios e modos físicos (no caso, eletromecânicos) (Jingmin, Chen e Feng, 2011; Phillips e Allemang, 2008; Auweraer e Peeters, 2004; Mrabet, Abdelghani e Kahla, 2014).

Tal diagrama é baseado na premissa de que modos físicos são pouco sensíveis a ordem do modelo identificado no processo de estimação modal. Observa-se na literatura uma vasta aplicação de diagramas de estabilização na estimação de modos oscilatórios em modelos de estruturas mecânicas, porém há muito pouca aplicação desta técnica para a estimação de modos eletromecânicos em sistemas de potência (Jingmin, Chen e Feng, 2011; Leandro R, e Silva A, Decker I, 2015; Phillips e Allemang, 2008; Auweraer e Peeters, 2004; Mrabet, Abdelghani e Kahla, 2014)

Neste artigo, propõe-se adaptar e aplicar a técnica de Diagrama de Estabilização para o contexto de sistemas elétricos de potência assim como apresentar estudos de caso visando mostrar que os diagramas de estabilização são eficientes para a classificação de modos físicos e espúrios tanto para o monitoramento de modos eletromecânicos de sistemas de G&T, quanto para sistemas de distribuição com GD/RED.

O primeiro conjunto de sinais foi gerado por simulações computacionais de um sistema teste de distribuição com diferentes tecnologias de GD/RED e o segundo conjunto de dados ambiente provenientes de  $\mu$ PMU's instaladas no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba. Em todos os casos, a estimação dos modos eletromecânicos é realizada pelo método N4SID (*Numerical Algorithm for Sub-space State Space System Identification*).

O presente artigo está estruturado da seguinte forma. Na seção 2 é apresentada uma sucinta discussão sobre modos eletromecânicos e sua formulação conceitual. Na seção 3 é descrita a metodologia empregada para estimação dos modos eletromecânicos. Na seção 4 é descrita a obtenção dos dados ambientes utilizados. Na seção 5 são apresentados e discutidos os resultados. Por fim, na seção 6 são apresentadas as conclusões finais

## 2. OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS DE BAIXA FREQUÊNCIA

A operação ambiente do sistema se caracteriza por pequenas variações de carga que acontecem naturalmente no sistema elétrico e acabam gerando desequilíbrio entre o torque elétrico e mecânico das máquinas síncronas (Kundur 1994), induzindo à oscilações no ângulo e velocidade angular destas máquinas. Tais oscilações são vistas como uma composição de diferentes dinâmicas de natureza oscilatória (modos oscilatórios), caracterizadas principalmente por uma certa frequência e amortecimento (Rogers, 2012).

De maneira conceitual os modos eletromecânicos podem ser calculados a partir de um modelo matemático conceitual do sistema na forma de espaço de estados (Kundur, 1994). Esse conjunto de equações não lineares é então linearizado em torno de um ponto de operação, podendo ser realizada na forma de um modelo de espaço de estados conforme a seguir:

$$\dot{\underline{x}}(t) = A\underline{x}(t) + B\underline{u}(t) \quad (1)$$

$$\underline{y}(t) = C\underline{x}(t) + D\underline{u}(t) \quad (2)$$

onde  $\underline{x}(t) \in R^n$  é o vetor dos estados,  $\underline{y}(t) \in R^m$  é o vetor de saída e  $\underline{u}(t) \in R^p$  o vetor de entrada do sistema;  $A \in R^{n \times n}$  representa a matriz dos estados,  $B \in R^{n \times p}$  a matriz de entrada,  $C \in R^{m \times n}$  a matriz de saída e  $D \in R^{m \times p}$  a matriz de controle da saída.

Os modos eletromecânicos são obtidos a partir dos autovalores e autovetores da matriz de estados e a frequência e o amortecimento desses modos são calculados por esses autovalores da seguinte forma:

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad (3)$$

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (4)$$

$$\zeta_i = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \times 100 \quad (5)$$

em que,  $\lambda_i$  é o i-ésimo autovalor da matriz A, sendo  $\sigma_i$  e  $\omega_i$  as partes real e imaginária, respectivamente. Ainda,  $f_i$  e  $\zeta_i$  são a frequência em hertz (Hz) e a taxa de amortecimento, respectivamente, do i-ésimo autovalor.

### 3. ESTIMAÇÃO DOS MODOS ELETROMECCÂNICOS VIA MÉTODOS DE DECOMPOSIÇÃO MODAL

A utilização de métodos de decomposição modal para estimar os modos eletromecânicos presentes no sistema necessita dos ajustes de alguns parâmetros para seu funcionamento de forma confiável. O fluxograma abaixo foi implementado com rotinas no software *Matlab* e apresenta as principais etapas utilizadas no processo.

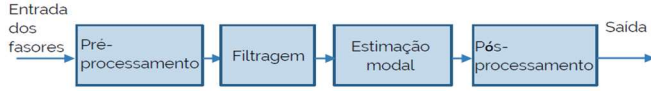


Fig. 1 Fluxograma identificação de modos eletromecânicos.

O tratamento dos sinais amostrados através do pré-processamento e filtragem buscam melhorar o desempenho do método de estimação modal. O método N4SID é utilizado devido a sua capacidade verificada em pesquisas anteriores em estimar os modos oscilatórios com sinais com presença significativa de ruído (Jingmin, Chen e Feng, 2011; Trudnowski *et al.*, 2008; Markovsky e Mercère, 2017).

As estimativas obtidas pelos métodos de decomposição modal apresentam um conjunto de modos físicos e modos espúrios, e classificar esses modos é uma tarefa relevante no processo como um todo. Para tanto, o pós-processamento dos modos estimados visando sua classificação será realizado pela técnica Diagrama de Estabilização (Jingmin *et al.* 2011).

#### 3.1 Etapa de pré-processamento

Tanto a tensão (módulo e ângulo de fase), como a frequência medidas pelas  $\mu$ PMU's podem ser usadas no processo de estimação modal. Porém, nos sinais de frequência e diferença angular, os modos eletromecânicos se mostram mais observáveis (Leandro R, e Silva A, Decker I, 2015). Utilizamos nesta pesquisa os sinais de frequência.

Para utilização de métodos baseados em subespaços (como é o caso do N4SID), se pressupõe a utilização de uma janela de dados teoricamente infinita. Isso implica na prática que essa janela de dados não deve ser pequena. No entanto, sistemas de potência não são estacionários e janelas muito grandes de dados podem prejudicar a estimação (Leandro R, e Silva A, Decker I 2015). Janelas de 5 minutos estão sendo utilizadas nesta pesquisa.

Pontos *outliers* são amostras com erro de medição caracterizada por uma variação significativa em relação às amostras vizinhas. A presença desses pontos pode levar ao aparecimento de falsos transientes no sinal filtrado (Leandro R, e Silva A, Decker I 2015). Portanto, é importante que os pontos *outliers* sejam identificados, removidos e substituídos por uma interpolação linear entre os pontos vizinhos.

Neste trabalho, a identificação dos pontos *outliers* é realizada usando o algoritmo proposto por Leandro R, e Silva A, Decker I (2015) cuja a base é dada por::

$$|MM_n| + \alpha\vartheta > |y_n| > |MM_n| - \alpha\vartheta \quad (6)$$

onde  $|MM_n|$  é a média móvel da  $n$ ésima amostra,  $\vartheta$  é o desvio padrão das  $n$  amostras,  $|y_n|$  é a amostra atual e  $\alpha$  é um escalar

que indica quantos desvios padrão são necessários para uma amostra ser considerada um *outliers*. Está sendo considerado um  $\alpha = 3$  nesta pesquisa.

A última etapa da preparação do sinal é a eliminação da tendência dos sinais, que é realizada removendo a média do sinal amostrado. Essa operação aumenta a relação sinal/ruído das amostras melhorando a estimação dos modos eletromecânicos.

#### 3.2 Filtragem

A presença de ruído em uma vasta faixa de frequências acaba por dificultar a precisão do modelo estimado. Como os modos eletromecânicos de baixa frequência nos sistemas considerados neste artigo estão dentro da faixa de 0.1 a 2 Hz, é utilizado um filtro passa-faixa butterworth de ordem 10 com frequências de corte entre 0.1Hz e 2Hz implementado em Matlab, buscando atenuar dinâmicas fora da faixa de interesse.

#### 3.3 Estimação Modal

O método N4SID faz parte de uma família de algoritmos de identificação de sistemas em subespaços de estados, que busca através da teoria de sistemas lineares obter um modelo caixa preta para o sistema (Katayama, 2005; Van Overschee 1996).

O método é apresentado a seguir:

- 1) Obtendo  $M+1$  amostras de  $l$  sinais, forma-se o vetor de saída  $y_0, y_1, \dots, y_M$ , onde  $y_k \in \mathbb{R}^{l \times 1}$  para  $k=0, \dots, M$ . Constrói-se a matriz de blocos Hankel estendida:

$$Y_p = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \dots & y_{j-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & \dots & y_{i+j-2} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{li \times j} \quad (6)$$

$$Y_f = \begin{bmatrix} y_i & y_{i+1} & \dots & y_{i+j-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \dots & y_{2i+j-2} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{li \times j} \quad (7)$$

sendo  $i$  um valor inteiro maior que a ordem do modelo  $n$ , e  $j$  dado pela equação  $j=M-2i+2$ .

- 2) Calcula-se a projeção

$$O_i = Y_f / Y_p \quad (8)$$

- 3) Calcula-se a decomposição do valor singular da projeção ponderada

$$W_1 O_i W_2 = USV^T \quad (9)$$

onde  $W_1$  e  $W_2$  são as matrizes de ponderação e dependem do método de subespaço escolhido. Para o N4SID o peso dessas matrizes é a identidade.

- 4) O sistema de ordem  $n$  é o número de valores singulares da matriz  $S$  diferentes de zero. A decomposição em valores singulares é realizada a seguir:

$$W_1 O_i W_2 = USV^T = [U_1 \ U_2] \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde  $U_1 \in \mathbb{R}^{li \times n}$ ,  $U_2 \in \mathbb{R}^{li \times (li-n)}$ ,  $S_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $S_2 \in \mathbb{R}^{(li-n) \times (j-n)}$ ,  $V_1^T \in \mathbb{R}^{n \times j}$  e  $V_2^T \in \mathbb{R}^{(j-n) \times j}$

- 5) A matriz de observabilidade estendida  $\Gamma_i$  é calculada

$$\Gamma_i = W_1^{-1} U_1 S_1^{1/2} \quad (11)$$

6) As matrizes A e C do modelo em espaço de estados são calculadas a partir da matriz de observabilidade estendida

$$A = \underline{\Gamma}_i^+ \bar{\Gamma}_i \quad (12)$$

$$C = \Gamma_i(1:l,:) \quad (13)$$

onde  $\underline{\Gamma}_i$  é a matriz de observabilidade estendida sem a última linha  $l$ , e  $\bar{\Gamma}_i$  é a matriz de observabilidade sem a primeira linha  $l$ .

Detalhes da formulação do método N4SID no contexto de sistemas elétricos de potência e estimação de modos eletromecânicos podem ser encontradas em Pataca, (2015)

### 3.4 Pós-Processamento – Diagrama de Estabilização

A identificação dos modos físicos e espúrios é realizada nesta etapa da análise dos dados, com a implantação do diagrama de estabilização. Esta técnica tem como premissa o fato de os modos físicos presentes no sistema apresentarem pouca variação de frequência e amortecimento com a variação da ordem do modelo identificado na etapa anterior.

Desta forma, modelos com ordem gradualmente maior são estimados. O diagrama de estabilização é então montado plotando os modos estimados para cada ordem de modelo. Para ser considerado um modo físico, o modo deve atender os critérios de estabilização dados pelas equações (14) e (15). Em outras palavras, devem atender a uma tolerância pré-estabelecida para a variação da frequência e amortecimento entre os modos de modelos com ordem subjacentes.

$$\left| \frac{f_i - f_{i+1}}{f_i} \right| \leq \zeta_f = 1\% \quad (14)$$

$$\left| \frac{\xi_i - \xi_{i+1}}{\xi_i} \right| \leq \zeta_\xi = 1\% \quad (15)$$

Uma proposta desta pesquisa na apresentação do diagrama de estabilização está na diferenciação por cores do amortecimento dos modos estáveis (reais). Os modos que estabilizarem com amortecimento menor que 5% são plotados em vermelho, amortecimento menor que 10% em amarelo, menor que 20% em azul, e os modos que estabilizarem com amortecimento maior que 20% são plotados em verde. Dessa forma é possível indicar os modos mais críticos à estabilidade do sistema.

## 4. DADOS AMBIENTES UTILIZADOS

Esse trabalho utiliza dados ambientes obtidos computacionalmente de um sistema teste de distribuição com a presença de GD/RED e dados ambientes coletados de  $\mu$ PMU's instaladas na minirrede de GD/RED do campus centro politécnico da UFPR.

### 4.1 Sistema teste de distribuição com GD/RED

Neste artigo foi utilizado como sistema teste uma rede de distribuição com uma grande inserção de GD/RED, conforme apresentado na figura 1. A rede é composta por 37 barras, nos quais estão incluídas cargas dinâmicas representadas por 18 motores de indução e cargas estáticas, totalizando uma carga de 10,85MW de potência ativa e 8,32MVA de potência

reativa. A geração distribuída (ou RED) é representada por 4 geradores síncronos, um gerador eólico de indução e 6 plantas de geração solar fotovoltaicas, totalizando uma geração de 18,44MW de potência ativa. Os parâmetros dos modelos da rede, dos transformadores, geradores síncronos e assíncronos, além dos painéis fotovoltaicos e cargas do sistema são apresentados em Kontis et al. (2018).

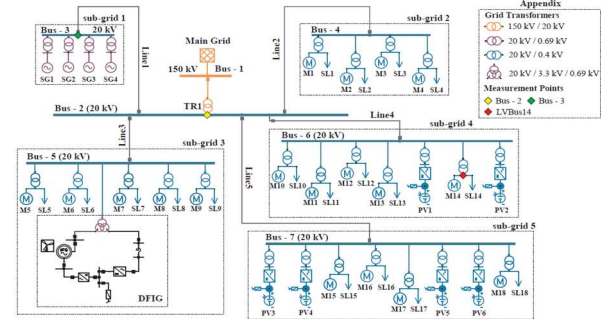


Fig. 2 Sistema teste de distribuição com GD/RED.

As simulações foram realizadas com o auxílio dos programas Anarede e Anatem, ambos desenvolvidos pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

Para simular uma situação em operação ambiente, 10% das cargas de cada barra foram variadas de forma randômica. Esta variação de carga é produzida por um algoritmo gerador de números pseudoaleatórios, com o intuito de simular as variações aleatórias de carga que ocorrem na rede (Prioste, 2011; Pataca, 2015).

Os modos eletromecânicos utilizados para a comparação foram calculados pelo programa Pacdyn (também desenvolvido pelo CEPEL). O Pacdyn apontou a presença de 3 modos intraplantas e 1 modo global, de acordo com a classificação proposta em Kuiava et al. (2008), abaixo na tabela 1. Esses modos são apresentados junto com o gerador em que se manifestam com mais intensidade, cuja análise foi feita a partir dos fatores de participação.

Tabela 1. Tabela Modos Pacdyn

Gerador	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
SG1	1,45	11,71
SG2	1,65	16,67
SG3	1,65	16,67
SG4	1,65	16,67

### 4.2 Sinais de $\mu$ PMU's instaladas na UFPR

As  $\mu$ PMU's utilizadas para coleta de dados fazem parte de um projeto P&D em parceria com a COPEL Distribuidora. Neste projeto, está sendo implantada no Campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR) uma minirrede baseada em geração solar fotovoltaica em pontos distintos do campus universitário, com potência total de 1,35MVA, além de um gerador síncrono à biodiesel com potência de 50KVA. Ainda, até o momento foram instaladas 3  $\mu$ PMU's neste mesmo campus da universidade, sendo o modelo de  $\mu$ PMU utilizado o PSL PQube3.

Ressalta-se que até o presente, as GDs planejadas para a minirrede ainda não entraram em operação, no entanto, o

sistema de coleta e armazenamento dos dados da rede já estão em funcionamento, disponibilizando os dados coletados pelos  $\mu$ PMU's para a análise. Desta maneira os dados ambientes utilizados deverão sofrer apenas influência dos modos presentes no sistema interligado nacional (SIN).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram processados dados ambientes coletados por simulações computacionais em um sistema de distribuição com GD/RED (conforme apresentado na seção 4.1) e medições fasoriais sincronizadas de  $\mu$ PMU's reais (conforme apresentado na seção 4.2). Nas subseções a seguir esses sinais serão apresentados junto com os diagramas de estabilização obtidos com a estimação dos modos pelo método N4SID, seguindo o procedimento apresentado pelo fluxograma da Figura 1.

### 5.1 Sistema teste de distribuição com GD/RED

A figura 3 mostra o sinal de desvio da frequência obtido pela medição da frequência na barra 3. Esta barra é onde estão conectados os geradores síncronos do sistema teste. As componentes contínuas do sinal foram eliminadas na etapa de pré-processamento.

Para realizar a comparação dos modos eletromecânicos estimados pelo N4SID com o diagrama de estabilização, o cálculo dos autovalores via modelo conceitual foi realizado através do software Pacdyn, onde foram identificados os modos eletromecânicos apresentados na tabela 1.

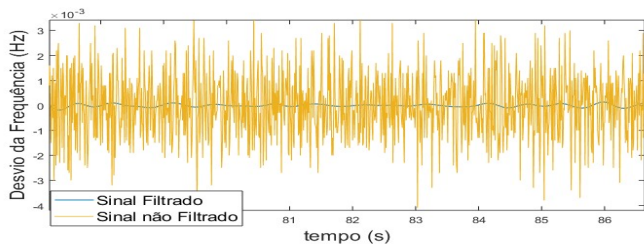


Fig. 3 Desvio de frequência na barra 3.

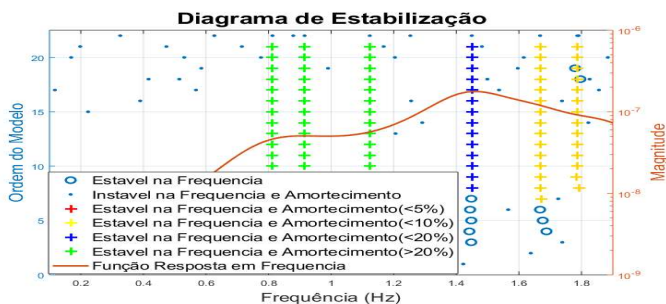


Fig. 4 Diagrama de estabilização do sistema teste de distribuição com GD/RED.

O diagrama de estabilização foi montado para uma ordem máxima igual a 22 e está apresentado na figura 4. Os modos de amortecimento menor que 20% estão apresentados na Tabela 2. Através da tabela 2, tomando como base o modelo conceitual da Tabela 1, nota-se que o diagrama de estabilização detectou modos eletromecânicos com frequência comparável com a do SG, e ligeiramente maior que a dos outros geradores. No que diz respeito ao amortecimento, o N4SID com o diagrama de estabilização detectou amortecimentos menores que os do modelo conceitual.

Tabela 2. Tabela Modos N4SID

Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
1,4493	11,90
1,6675	8,71
1,7866	9,01

Um ponto importante em relação ao diagrama de estabilização está no fato que o algoritmo identifica se a frequência e o amortecimento estabilizam, mas não qual o nível de amortecimento dos modos estabilizados. Em sistemas elétricos apenas os modos eletromecânicos pouco amortecidos são relevantes para a análise de estabilidade do sistema. Sendo os modos identificados pelo diagrama com menor amortecimento comparáveis com os modos obtidos pelo Pacdyn.

### 5.2 Dados ambientes reais de $\mu$ PMU's

Os sinais medidos da frequência pelas  $\mu$ PMU's localizadas no Centro Politécnico da UFPR foram utilizadas como entrada ao processo de pré-processamento e filtragem como pode-se observar na figura 5.

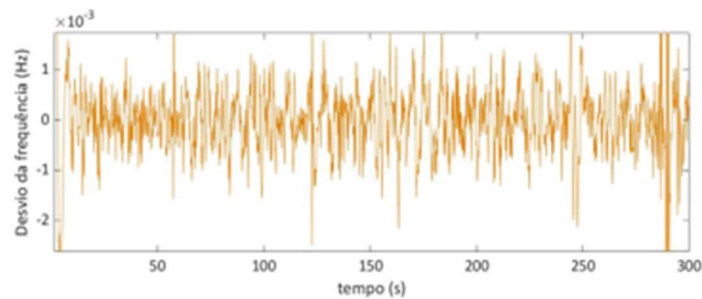


Fig. 5 Desvio de frequência uPMU UFPR

O diagrama de estabilização gerado a partir dos modos estimado pelo N4SID com ordem máxima de 28 não apresenta modos locais estimulados no sistema de distribuição, como esperado pelo fato do gerador síncrono não estar em operação. Porém, foi possível detectar o reflexo de alguns modos presentes no Sistema Integrado Nacional (SIN), como o modo interárea do sistema Sul e Sudeste (próximo de 0,2Hz) e o modo interárea entre o estado do RJ e o restante do SIN (próximo de 1,2Hz) (Prioste, 2011).

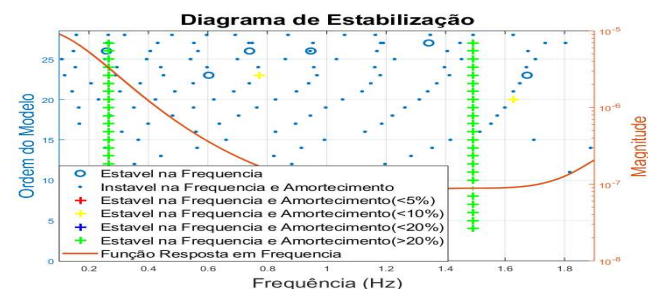


Fig. 6 Diagrama de Estabilização da Rede Distribuição

## 6. CONCLUSÕES

A presença cada vez maior de geração distribuída em redes de distribuição trará desafios para uma operação segura e confiável dos sistemas de energia. O monitoramento da rede elétrica por  $\mu$ PMU's possibilita o acompanhamento dos modos eletromecânicos presentes na rede e a tomada de medidas

preventivas ou corretivas caso se detecte que o amortecimento dessas oscilações se deteriore.

Esse trabalho utilizou um método consagrado na estimação de modos eletromecânicos em dados ambientes, junto com uma técnica para identificar os modos espúrios, presentes na estimação dos modelos, conhecida como diagrama de estabilização, que forneceu uma análise gráfica de fácil compreensão dos modos eletromecânicos físicos presentes.

A proposta de discriminação por cores do amortecimento dos polos físicos identificados pelo diagrama de estabilização poderá tornar mais rápida a identificação dos modos mais problemáticos em relação a estabilidade do sistema, adaptando assim o diagrama de estabilização a realidade dos sistemas elétricos de potência.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico da Companhia Paranaense de Energia – COPEL, através do projeto PD 2866-0470/2017, regulado pela ANEEL.

#### REFERÊNCIAS

- Auwerker, H. Van Der e Peeters, B. (2004) ‘Discriminating Physical Poles from Mathematical Poles in High Order Systems : Use and Automation of the Stabilization Diagram’, *21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 2193–2198.
- Dosiek, L. Zhou, N. Pierre, J.W. Huang, Z. Trudnowski, D.J. (2013) ‘Mode Shape Estimation Algorithms Under Ambient Conditions: A Comparative Review’, *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2), pp. 779–787.
- Jingmin, N., Chen, S. e Feng, L. (2011) ‘Estimating the electromechanical oscillation characteristics of power system based on measured ambient data utilizing stochastic subspace method’, *2011 IEEE Power and Energy society general meeting*.
- Katayama, T. (2005) *Subspace Methods for System Identification*. Springer.
- Kontis, E. O., Papadopoulos, T. A. Barzegkar-Ntovom, G. A. Chrysochos, A. I. Papagiannis, G. K. (2018) ‘Modal analysis of active distribution networks using system identification techniques’, *International Journal of Elsevier*.
- Kuiava, R. Ramos, R. A. de Oliveira, R. V. Bretas, N.G. (2008) ‘An Analysis of the Potential Impacts of Electromechanical Oscillations on the Stability and Power Quality of Distributed Generation Systems’, *IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1–7.
- Kundur, P. (1994) *Power System Stability and Control*.
- Leandro R, e Silva A, Decker I, A. M. (2015) ‘Identification of the Oscillation Modes of a Large Power System Using Ambient Data’, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. Springer , pp. 441–453.
- Liu, G. e Venkatasubramanian, V. M. (2008) ‘Oscillation Monitoring from Ambient PMU Measurements by Frequency Domain Decomposition’, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 2821–2824.
- Markovsky, I. e Mercère, G. (2017) ‘Subspace identification with constraints on the impulse response’, *International Journal of Control*. Taylor & Francis.
- Meier, A. Von (2014) ‘Micro-Synchrophasors for Distribution Systems’, *ISGT 2014*. IEEE, pp. 1–5.
- Mrabet, E., Abdelghani, M. e Kahla, N. Ben (2014) ‘A New Criterion for the Stabilization Diagram Used with Stochastic Subspace Identification Methods : An Application to an Aircraft Skeleton’, *Shock and Vibration*, 2014(1), pp. 1–8.
- Pataca, L. C. (2015) *Identificação Modal a Partir de Dados Ambiente em Sistemas com Geração Síncrona Distribuída*. Universidade de São Paulo (USP).
- Phillips, A. W. e Allemang, R. J. (2008) ‘Additional Mechanisms for Providing Clear Stabilization ( Consistency ) Diagrams’, *Noise and Vibration Engineering*.
- Kundur, P. Paserba, J. Ajarapu, V. Andersson, G. Bose, A. Canizares, C. Hatzargyriou, N. Hill, D. Stankovic, A. Taylor, C. ‘Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions’, *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1387–1401.
- Prioste, F. B. (2011) *Detecção e controle de oscilações eletromecânicas usando sistemas de medição fasorial sincronizada*. repositorio.ufsc.br.
- Rogers, G. (2012) *Power system oscillations*. Series
- Salim, R. H. Kuiava, R. Ramos, R. A. Bretas, N. G. (2011) ‘Impact of power factor regulation on small-signal stability of power distribution systems with distributed synchronous generators’, *European Transactions on Electrical Power*. 21(7), pp. 1923–1940.
- Trudnowski, D.J. Pierre, J.W. Zhou, N. Hauer, J.F. Parashar, M. (2008) ‘Performance of Three Mode-Meter Block-Processing Algorithms for Automated Dynamic Stability Assessment’, *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 680–690.
- Trudnowski, D. J. e Pierre, J. W. (2009) ‘Overview of algorithms for estimating swing modes from measured responses’, in *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. pp. 1–8.
- Turunen, J. Larsson, Mats. Thambirajah, J. Haarla, L.C. Rauhala, T. (2011) ‘Recent developments in modal estimation of power system electromechanical oscillations’, *IEEE Trondheim PowerTech*, pp. 1–7.
- Van Overschee, Peter (1996) *Subspace Identification for Liner System*.