DOI: 10.48011/asba.v2i1.1445

Identificação de oscilações eletromecânicas: Estudos de aplicação em dados de ambiente de sistemas reais

Juliana L. Pereira * **Ildemar C. Decker** **

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, (e-mail: jluizapereira@gmail.com).*
** *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, (e-mail: ildemar.decker@gmail.com)*

Abstract: This work presents a research about electromechanical modes estimation methodology using ambient data in real power systems. The methodology of estimation and analysis is constituted by signal processing techniques and system identification methods, that have been implemented in an algorithm for the purposes of real-time monitoring of electromechanical modes. The signals are acquired by a Synchronized Phasor Measurement System (SPMS), installed in high and low voltage, located in many places of Brazilian electric power system.

Resumo: Neste trabalho são apresentados estudos de uma metodologia de estimação de modos de oscilação eletromecânica para dados de ambiente em sistemas reais de grande porte. A metodologia de estimação e análise é composta por técnicas de processamento de sinais e métodos de identificação modal implementados em um aplicativo computacional para monitoramento de oscilações eletromecânicas em tempo real. Os sinais são obtidos de um Sistema de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF), instalados em alta e baixa tensão, dispostos em vários pontos do Sistema Interligado Nacional(SIN).

Keywords: Electromechanical Oscillations; Identification Methods; Welch Method; Syncrophasors; Ambient Data.

Palavras-chaves: Oscilações Eletromecânicas; Métodos de Identificação Modal; Método de Welch; Sincrofasores; Dados Ambiente.

1. INTRODUÇÃO

A expansão dos sistemas de potência vinculada ao crescimento do número de unidades geradoras e do sistema de transmissão resultou em maior complexidade do sistema elétrico. As interligações dos sistemas de potência fazem com que as oscilações eletromecânicas alcancem áreas maiores, e se tornem um problema caso não sejam amortecidas devidamente. Da mesma maneira, tecnologias permitem o monitoramento da dinâmica do sistema em tempo real, e com o auxílio de métodos de identificação, detectam as oscilações que possam originar perda de estabilidade e causar danos ao sistema.

Um dos problemas da estabilidade de pequenos sinais é o amortecimento insuficiente das oscilações eletromecânicas, por isso o acompanhamento dessas informações pode melhorar a operação e confiabilidade do sistema. Em termos de análise, as oscilações são classificadas de acordo com suas características de interação. As oscilações de frequência subsíncrona podem ser do tipo locais, interárea, intraplanta, torsionais (Kundur et al., 1994) e ainda oscilações forçadas (Vanfretti et al., 2015). Neste documento é estudada a identificação de oscilações interárea, que compreendem a faixa de frequência resultante da interação entre duas áreas do sistema elétrico.

⋆ Suporte financeiro da CAPES e INESC P&D Brasil.

A estimação dos modos de oscilação é realizada por meio de métodos de identificação modal, que consiste na aplicação de informações modais obtidas de medidas no domínio do tempo em métodos predefinidos. Os métodos de identificação implementados no aplicativo utilizado são modificados com o objetivo de investigar problemas na metodologia de estimação *online* dos modos de oscilação em dados de ambiente. E por fim, são verificados os resultados obtidos com a variação de parâmetros, e propostas recomendações de melhorias metodológicas e de parametrização dos métodos.

Os sinais utilizados pelos métodos de identificação são oriundos de um Sistema de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF), instalados em baixa tensão, nas cinco regiões geográficas do Brasil, como também em outros países. A implementação do sistema de medição foi desenvolvida pelo Projeto MedFasee na UFSC.

2. ESTABILIDADE E IDENTIFICAÇÃO DE OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS

A estabilidade de sistemas de potência pode ser definida como a propriedade do sistema de permanecer em um estado de equilíbrio sob condições normais de operação ou de retornar às condições de equilíbrio depois de ser submetido a uma perturbação (Kundur et al., 1994) com

a integridade do sistema mantida. A instabilidade em sistemas de potência pode manifestar-se de diferentes maneiras dependendo da configuração do sistema, do modo de operação e do tipo de perturbação. Para identificação dos fatores que contribuem para a instabilidade, e para melhor desenvolvimento de métodos que contribuam para a operação estável, a estabilidade é classificada em algumas categorias. São elas: Estabilidade Angular, de Frequência e de Tensão. As oscilações eletromecânicas são objeto de estudo da estabilidade angular de pequenos sinais que preocupa-se com a interação de máquinas síncronas dispostas em um sistema elétrico interligado, e na habilidade do sistema de manter o sincronismo quando sujeito a pequenas perturbações. Os tipos mais comuns de oscilações encontrados em um sistema elétrico são (Kundur et al., 1994) e (Pal and Chaudhuri, 2006):

- Modos de oscilação intraplanta: máquinas geradoras de uma mesma usina que oscilam uma contra a outra em uma faixa de frequência de 2,0 a 2,5 Hz.
- Modos de oscilação locais: ocorre quando um gerador oscila contra o restante do sistema, faixa de frequência entre 1,0 e 2,0 Hz.
- Modo de oscilação interárea: envolve dois grupos de geradores oscilando um contra o outro em frequências menores que 1,0 Hz.
- Modos de oscilação torsionais: estão associados ao eixo da turbina do gerador. Quando há uma perturbação no gerador, ocorrem oscilações entre as diferentes seções que compõe o rotor. Essas oscilações podem interagir com o sistema elétrico de maneira prejudicial. A faixa de frequência desse tipo de oscilação está entre 10 e 46 Hz.

O modo de oscilação é composto por frequência de oscilação e taxa de amortecimento, obtidos dos autovalores resultantes da matriz de estados A que representa o sistema. As características modais podem ser obtidas a partir de um autovalor complexo conjugado:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \tag{1}$$

A frequência de oscilação em hertz é dada por:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \tag{2}$$

A taxa de amortecimento da oscilação é dada por:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \tag{3}$$

Os modos de oscilação eletromecânicos são respostas dinâmicas dos sistemas elétricos e classificados em dois tipos de sinais, *ringdown* e ambiente (Vanfretti et al., 2011):

- *Ringdown*: são transitórios de grande intensidade que geram oscilações em consequência de uma grande perturbação, como curto-circuito e perda de blocos de carga ou geração.
- Dados ambiente: são transitórios de baixa intensidade, consequência de pequenas perturbações ocasionadas por variações de carga.

Os modos de oscilação eletromecânicos característicos de um sistema elétrico podem ser estimados através de duas abordagens, a primeira baseada na modelagem matemática do sistema, e a segunda que consiste na aplicação de medidas no domínio do tempo em métodos predefinidos, chamados de métodos de identificação modal.

Os métodos de identificação podem ser classificados entre métodos paramétricos e não paramétricos. Os métodos não paramétricos são baseados em fórmulas de autocorrelação para reconstrução do sinal, e os métodos paramétricos que resolvem as equações lineares do sistema fornecendo todas as características do modo.

2.1 Métodos de identificação

A metodologia emprega dois métodos, o método de Welch, não paramétrico, que estima a frequência de oscilação de maneira indireta através de um periodograma modificado (Welch, 1967), e o método de subespaço de estados, paramétrico, que consiste em obter as matrizes de estado utilizando técnicas de álgebra linear aplicadas às medidas no domínio do tempo. O sistema é tratado como puramente estocástico, portanto sem considerar entradas externas. O método de Welch é amplamente utilizado em trabalhos para estimação de modos de oscilação, e consiste na aplicação da transformada de Fourier em segmentos sobrepostos da janela de dados para formação do periodograma. O espectro de frequência resultante possui maior amplitude no valor de frequência do modo dominante.

A escolha dos dois métodos se deve a estratégia de verificação cruzada dos resultados obtidos, criada com o intuito de identificar possíveis falhas na estimação dos modos.

Método de subespaço de estados O método de subespaço de estados estocástico utiliza modelos da forma (Van Overschee and De Moor, 2012):

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k \tag{4}$$

$$y_k = Cx_k + v_k \tag{5}$$

O vetor $y_k \in \Re^{l\times 1}$ contém as medidas no instante k, de l saídas. O vetor de ruídos das medidas $v_k \in \Re^{l\times 1}$ e o vetor de ruídos do processo $w_k \in \Re^{n\times 1}$ são sinais não-observáveis (Favoreel et al., 2000), portanto não podem ser medidos (Van Overschee and De Moor, 2012).

A matriz $A \in \Re^{n\times n}$ é chamada de matriz de estados, e descreve a dinâmica do sistema através dos autovalores que a compõe. $C \in \Re^{l\times n}$ é a matriz de saída que descreve como o estado interno influencia as medidas y_k.

O algoritmo escolhido para a identificação dos modos de oscilação é o método de subespaço de estados CCA (*Canonical Correlation Analysis*), e os principais passos de resolução do problema de identificação modal são descritos em (Van Overschee and De Moor, 2012) e (Katayama, 2006) e são apresentados de forma resumida abaixo:

(1) Considera-se uma sequência de vetores de saída $y_0, y_1, ..., y_M$, onde $y_k \in \Re^{l\times 1}$ para $k = 0, 1, ..., M$. Com esses dados constroem-se as matrizes de bloco de Hankel estendidas (i é um inteiro pré-selecionado maior que n, j é determinado por $j = M - 2i + 2$):

$$\mathbf{Y_p} \equiv \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{j-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & \cdots & y_{i+j-2} \end{bmatrix} \in \Re^{li \times j} \tag{6a}$$

$$\mathbf{Y_f} \equiv \begin{bmatrix} y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{bmatrix} \in \Re^{li \times j} \tag{6b}$$

(2) As matrizes de Hankel estendidas aplicam-se nas equações:

$$Y_p = \Gamma_i x_p + H_i W_p + V_p \tag{7a}$$

$$Y_f = \Gamma_i x_f + H_i W_f + V_f \tag{7b}$$

O subscrito p refere-se a dados definidos como "passados" e o subscrito f refere-se a dados definidos como "futuros". A matriz de observabilidade estendida $\Gamma_i \in \Re^{li \times n}$. E a matriz H_i é a matriz triangular inferior de Toeplitz. As matrizes W e V são respectivamente formadas pelos dados de ruídos do processo e ruídos das medidas.

(3) Calcular a projeção ortogonal do espaço linha da matriz Y_f no espaço linha da matriz Y_p. Utiliza-se como ferramenta numérica para o cálculo da projeção ortogonal a decomposição RQ (Van Overschee and De Moor, 2012).

$$\mathcal{O}_i \equiv \mathbf{Y_f}/\mathbf{Y_p} \tag{8}$$

(4) Calcular a decomposição em valores singulares da projeção ponderada, por meio de "(9)".

$$\mathbf{W_1} \mathcal{O}_i \mathbf{W_2} = \mathbf{USV^T} \tag{9}$$

onde $\mathbf{W_1}$ e $\mathbf{W_2}$ são as matrizes de peso que diferem de acordo com o método de subespaço de estados escolhido, U e V são matrizes ortogonais e S é uma matriz diagonal contendo os valores singulares da projeção ponderada. Para o método de subespaços CCA, $\mathbf{W_1}$ é igual a $\Phi^{-1/2}_{[Y_f,Y_f]}$ (onde $\Phi_{[Y_f,Y_f]}$ é a matriz de covariância da matriz $\mathbf{Y_f}$) e $\mathbf{W_2}$ é uma matriz identidade.

(5) Particionar a decomposição em valores singulares da seguinte forma:

$$\mathbf{W_1} \mathcal{O}_i \mathbf{W_2} = \mathbf{USV^T} = [\mathbf{U_1} \ \mathbf{U_2}] \begin{bmatrix} \mathbf{S_1} & 0 \\ 0 & \mathbf{S_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V_1^T} \\ \mathbf{V_2^T} \end{bmatrix} \tag{10}$$

onde $\mathbf{U_1} \in \Re^{il \times (il-n)}$, $\mathbf{U_2} \in \Re^{il \times (il-n)}$, $\mathbf{S_1} \in \Re^{n \times n}$, $\mathbf{S_2} \in \Re^{(il-n) \times (j-n)}$, $\mathbf{V_1^T} \in \Re^{n \times n}$ e $\mathbf{V_2^T} \in \Re^{(j-n) \times j}$. A ordem n do sistema é definida como igual ao número de valores singulares significantes na matriz $\mathbf{S}$.

(6) Calcular a matriz de observabilidade estendida ($i > n$) Γ_i.

$$\Gamma_i = \mathbf{W_i^{-1} U_i S_1^{1/2}} \tag{11}$$

A matriz de observabilidade estendida possui a seguinte formulação:

$$\Gamma_i = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA^2} \\ \cdots \\ \mathbf{CA^{i-1}} \end{bmatrix} \in \Re^{li \times n} \tag{12}$$

(7) No último passo são obtidas as matrizes $\mathbf{A}$ e $\mathbf{C}$ a partir da matriz de observabilidade estendida. A matriz $\mathbf{A}$ é definida como:

$$\mathbf{A} = \underline{\Gamma_i}^{\dagger} \overline{\Gamma_i} \tag{13}$$

$\underline{\Gamma_i}^{\dagger}$ e $\overline{\Gamma_i}$ são as matrizes de observabilidade estendida $\overline{\Gamma_i}$, sem as últimas l linhas e sem as primeiras l linhas, respectivamente. E o sinal (†) é utilizado para representar a pseudo-inversa de uma matriz.

A matriz $\mathbf{C}$ é determinada pelas primeiras l linhas de Γ_i.

3. APLICATIVO COMPUTACIONAL

O aplicativo desenvolvido por (Leandro, 2014) chamado MedPlot RT foi construído com a finalidade de monitorar as oscilações eletromecânicas em tempo real e *Playback*. O aplicativo é composto pelas seguintes partes:

- Aquisição: consiste em estabelecer conexão com um dos locais de armazenamento de dados (PDC - *Phasor Data Concentrator*) para receber o fluxo de dados.
- Interpretação: consiste em interpretar os pacotes de dados que são enviados em tempo real pelo PDC através do fluxo de dados. O formato dos *frames* de dados está padronizado de acordo com a norma IEEE C37.118-2 (2011).
- Organização: as informações são estruturadas e separadas em terminais de medição e grandezas elétricas, deixando sua utilização mais prática.
- Monitoramento: dispõe ao usuário acesso às grandezas fasoriais organizadas por "terminais de medição" no aplicativo.
- Identificação dos modos de oscilação: os sinais temporais são aplicados nos métodos de subespaço de estados CCA no método de Welch. Os resultados de ambos passam por uma verificação cruzada a cada ponto estimado, e então o modo validado é exibido para o usuário na interface do aplicativo. Antes disso os sinais passam por uma etapa de pré-processamento de dados, que consiste em remoção de *outliers*, remoção da média, filtragem e dizimação.

O método de subespaço de estados determina todos os modos encontrados em uma janela de dados, de acordo com a ordem do modelo n. Além desta, outros parâmetros podem ser ajustados, como o número de linhas por bloco das matrizes de Hankel e o tamanho da janela de dados. O padrão utilizado para o monitoramento dos modos no aplicativo é ordem do modelo igual a 8 e 20 linhas por bloco. Entre os modos calculados, existem ferramentas de ordenação utilizadas para identificar qual modo é o dominante (modo de oscilação real), e os demais são considerados modos espúrios, resultantes de artifícios matemáticos, que são descartados. As ferramentas de ordenação citadas são a pseudo-energia e o índice de dominância modal (IDM).

Neste estudo todos os modos estimados pelo método de subespaço de estados são rastreados e analisados. A metodologia consiste em calcular a pseudo-energia para todos os modos estimados, o modo com maior pseudo-energia é considerado dominante e portanto real. Então, a frequência de oscilação do modo dominante é utilizada para validação, se estiver dentro de um limiar da frequência

do método de Welch, esta é então validada. Este processo é repetido a cada nova janela de dados, até que todo o período de dados seja completado.

O monitoramento em tempo real de modos de oscilação pelo aplicativo apresenta as informações modais a partir de dados ambiente, onde não há perturbações severas no sistema elétrico. Quando há não estacionariedades presentes no sinal, deve ser aplicada a análise *Ringdown*, com outros métodos mais apropriados. Em alguns períodos os dados não são apresentados, pois o modo dominante não é validado.

4. ESTUDO DE APLICAÇÃO AO SISTEMA BRASILEIRO

Nesta seção apresenta-se o monitoramento de alguns casos registrados no SIN (Sistema Interligado Nacional). O primeiro caso registra o monitoramento de um modo interárea Norte-Sul, sob condição de operação de alto amortecimento. Condições de alto amortecimento podem dificultar a detecção do modo pelos métodos de identificação. Os seguintes casos utilizam sinais de tensão (diferença angular) e potência ativa. O objetivo desta seção é verificar as influências da variação de parâmetros, o tipo de sinal empregado na estimação dos modos e analisar os períodos em que não há modos validados pelo aplicativo.

4.1 Condição de operação: Alto amortecimento

O período de análise para este caso foi registrado no dia 26 de setembro de 2019, entre 11:40h e 13:00h (UTC), utilizando dois sinais de frequência medidos em terminais de baixa tensão localizados na Universidade Federal do Ceará (UFC) em Fortaleza e na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Os sinais de frequência medidos estão na Figura 1.

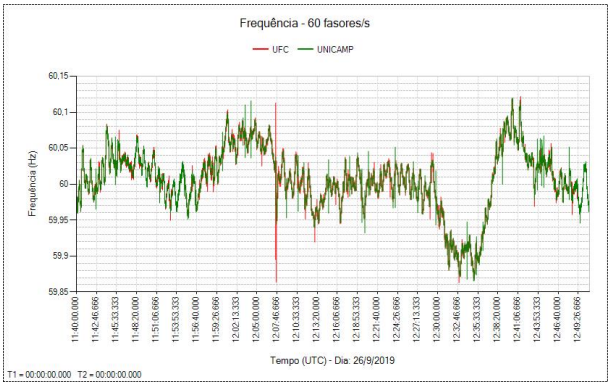

Figura 1. Sinais de frequência dos terminais da Unicamp e UFC.

Ordem do modelo estimado - CCA A metodologia de análise consiste em manter dois parâmetros fixos, e variar em valores definidos o terceiro parâmetro. Estão mantidos fixos o número de linhas por bloco igual a 20, e o tamanho da janela de dados em 10 minutos. Os valores escolhidos para ordem do modelo são definidos como 6, 8, 10 e 14.

A estimação de modos pelo aplicativo pode apresentar alguns períodos em que o modo dominante não é validado, como é observado na Figura 2. No entanto, isso não indica que o modo de interesse não foi identificado pelo método de subespaço.

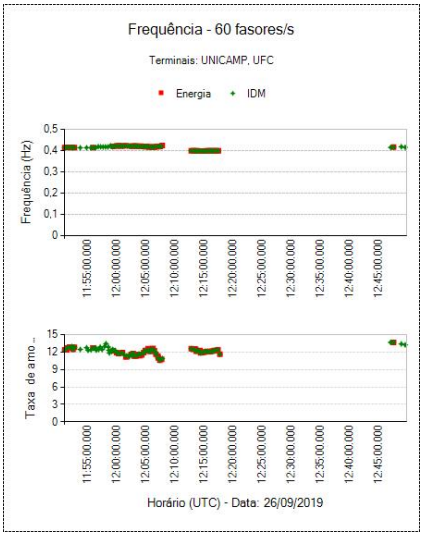

Figura 2. Frequência de oscilação e taxa de amortecimento validadas pelo aplicativo (Ordem 6) 26/09/2019.

Ao analisar todos os modos estimados pelo método CCA, verifica-se que são identificados modos em faixas de frequência distintas. Para ordem do modelo 6, são estimados três pares de autovalores (Autovalor real ou complexo conjugado). Para este caso, são rastreados três modos com frequência de oscilação na faixa de 2,5 Hz, 1,5 a 2,0 Hz e 0,39 a 0,43 Hz.

O modo de oscilação interárea Norte-Sul é de aproximadamente 0,4 Hz, e é identificado continuamente em todos os pontos estimados pelo método no período de monitoramento, como mostra a Figura 3 para o caso de ordem 6. Os outros dois modos apresentam descontinuidades na estimação, e em alguns pontos tem maior pseudo-energia como indica a Figura 4.

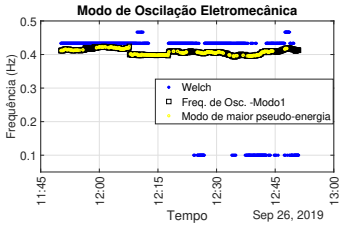

Figura 3. Frequência de oscilação (Modo1) (Ordem 6) 26/09/2019.

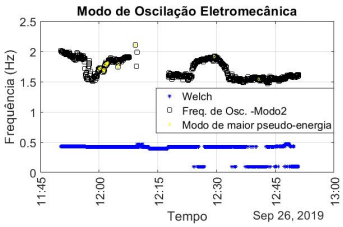

Figura 4. Frequência de oscilação (Modo2) (Ordem 6) 26/09/2019.

Os pontos em preto indicam a frequência estimada pelo método CCA, os pontos em amarelo mostram quais dos

pontos estimados possuem maior pseudo-energia. E os pontos em azul são a frequência estimada pelo método de Welch. A cada janela de dados, um ponto é estimado.

Tabela 1. Comparativo: quantidade de pontos calculados e validados (Ordem do modelo).

Ordem do modelo	**6**	**8**	**10**	**14**
Pontos esperados	732	732	732	732
Pontos estimados	731	731	730	730
Pontos validados	168	206	81	42

O aumento da ordem do modelo não melhora os resultados, e reduz gradativamente a quantidade de pontos validados, seja por problemas da pseudo-energia em identificar o modo dominante, ou pela frequência do modo dominante não ser validada com a frequência de oscilação do método de Welch. A Tabela 1 mostra a quantidade de pontos validados para cada ordem do modelo utilizada.

Número de linhas por bloco das matrizes de Hankel - CCA Para esta seção mantém-se a ordem do modelo em 6 para todos os experimentos, e também a janela com duração de 10 minutos. O número de linhas por bloco das matrizes de Hankel é modificado a cada caso, são utilizados os valores 20, 40, 60, 80, 100 e 120.

Tabela 2. Comparativo: quantidade de pontos calculados e validados (26/09/19).

Nº de linhas por bloco	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**
Pontos esperados	732	732	732	732	732	732
Pontos estimados	730	730	721	730	668	730
Pontos validados	168	195	267	321	336	175

O aumento do número de linhas por bloco nas matrizes de Hankel tem como resultado o aumento na quantidade de pontos validados, principalmente nos casos que utilizam 80 e 100 linhas por bloco. Nestes casos, a ordenação por pseudo-energia tem melhor desempenho ao escolher o modo dominante. Ainda assim, a frequência de Welch impede a validação dos pontos estimados entre 12:33h e 12:43h como se observa na Figura 5.

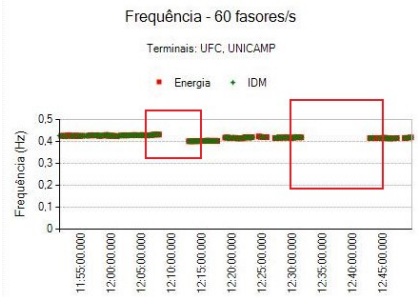

Figura 5. Frequência de oscilação apresentada pelo MedPlot RT (80 linhas).

Tamanho da janela de dados - Welch e CCA O tamanho da janela de dados é modificado a cada caso, os tamanhos escolhidos foram de 2, 6, 8 e 10 minutos. Os demais parâmetros são mantidos constantes, ordem do modelo igual a 8 e número de linhas por bloco igual a 20. O período total de análise permanence o mesmo. Como será visto ao final desta seção, o número de pontos estimados pelos métodos aumenta conforme o tamanho da janela de dados diminui, isso ocorre para manter a resolução mínima dos periodogramas estimados pelo método de Welch. Considerando que o tamanho da janela usada seja de 10 minutos (600 segundos), e a resolução do sinal, após o processo de dizimação seja de 5 Hz (sinais originais tem resolução de 60 fasores por segundo), pode-se calcular o número de pontos por segmentos e a respectiva resolução dos periodogramas como:

$$L = \frac{600\ s \times 5\ Hz}{20\ segmentos} = 150\ pontos/segmentos \tag{14}$$

$$\Delta f = \frac{5\ Hz}{150} = 0,033\ Hz \tag{15}$$

A resolução calculada na "(15)" é mantida em todos os casos, e o número de segmentos varia em cada um deles.

A extrema redução no tamanho da janela de dados não se mostra adequada principalmente para o método de Welch como pode ser visto na Figura 6, pois há maior variação nos valores de frequência e amortecimento obtidos a cada janela.

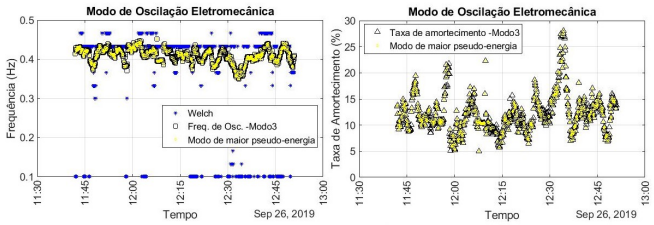

Figura 6. Frequência de oscilação e taxa de amortecimento do modo real (Janela de 2 minutos).

Tabela 3. Comparativo: quantidade de pontos calculados e validados 26/09/19.

Tamanho da janela de dados (min)	**2**	**6**	**8**	**10**
Pontos esperados	828	780	756	730
Pontos estimados	828	780	767	730
Pontos validados	225	195	202	206

Como pode ser visto na Tabela 3, o número de pontos validados fica em torno de 70% dos pontos estimados para todos os tamanhos de janelas utilizados. No entanto, os modos estimados para o tamanho de janela igual a 10 minutos apresentam valores mais precisos, e com menor dispersão entre cada ponto estimado.

4.2 Aplicação a sinais de outras grandezas elétricas

Defasagem angular de tensão Nesta seção é monitorado o modo de oscilação Norte-Sul do SIN no dia 10 de fevereiro de 2020 entre 13:00h e 14:00h (UTC). A análise utiliza sinais de diferença angular entre as tensões de sequência positiva dos terminais instalados na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e Universidade de São Paulo - São Carlos (USP-SC) (com o terminal da Universidade de Brasília (UnB) como referência angular). O sinal está representado na Figura 7.

Quatro casos são definidos, com variação na ordem do modelo, os parâmetros empregados são: 20 linhas por

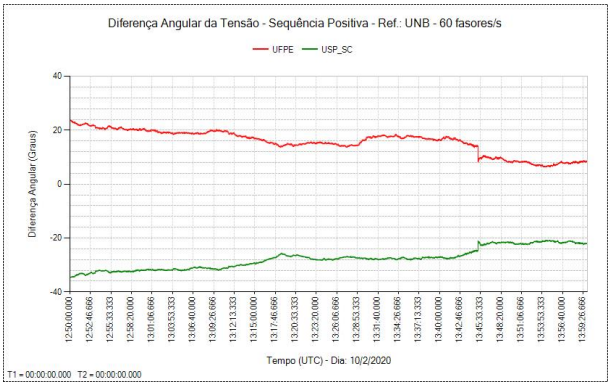

Figura 7. Diferença angular entre UFPE e USP-SC (ref.UnB).

bloco, janelas de 10 minutos e ordem do modelo de 6, 8, 10, 14.

No primeiro caso com ordem do modelo 6, apenas dois modos são estimados e o modo real não é estimado continuamente pelo método de subespaços. O melhor resultado ocorre somente quando é utilizada ordem 10, então o modo real é identificado em todas as janelas do período, e ainda apresenta maior pseudo-energia na maioria dos pontos estimados como mostra a Figura 8.

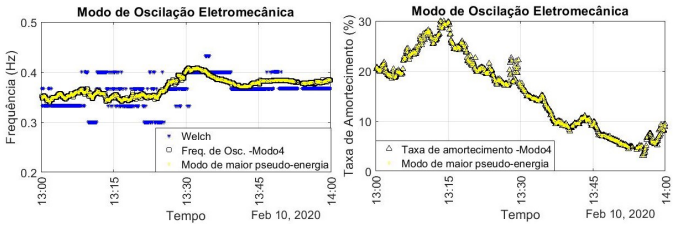

Figura 8. Modos de oscilação eletromecânica (Ordem 10).

Tabela 4. Comparativo entre quantidade de pontos calculados e validados (Ordem do modelo).

Ordem do modelo	**6**	**8**	**10**	**14**
Pontos esperados	720	720	720	720
Pontos estimados	719	718	719	720
Pontos validados	366	442	475	144

Para o sinal de diferença angular, o modo real foi estimado continuamente e escolhido como dominante por meio da pseudo-energia utilizando ordem do modelo 10. Para este caso também é identificado um modo local, com frequência de oscilação de aproximadamente 1,8 Hz. O modo local não é dominante pelos critérios de pseudo-energia, mas é estimado durante todo o período de análise.

Potência ativa Com o intuito de analisar o desempenho dos métodos para sinais de alta tensão, são utilizados dois sinais de potência ativa obtidos de duas linhas de transmissão que ligam as subestações de Serra da Mesa a Samambaia, e de Miracema a Colinas no estado de Tocantins. O período de monitoramento é de cerca de 1 hora, das 10:00h às 11:00h (UTC), do dia 08 de setembro de 2019.

O sinal de potência é obtido em virtude da disponibilidade das medidas de corrente, além das habituais medidas de tensão. A análise de desempenho também é aplicada ao uso de um, e dos dois sinais de potência. Desta forma, foram fixados os parâmetros de ordem do modelo igual a 8, 20 linhas por bloco das matrizes de Hankel e janelas de 10 minutos de dados. A maior quantidade de pontos validados é para o caso com os dois sinais de potência ativa (Tabela 5).

Tabela 5. Comparativo entre pontos estimados e validados.

Número de sinais	**1**	**2**
Pontos esperados	720	720
Pontos estimados	720	716
Pontos validados	394	540

O modo de oscilação identificado e validado pelo aplicativo é apresentado na Figura 9.

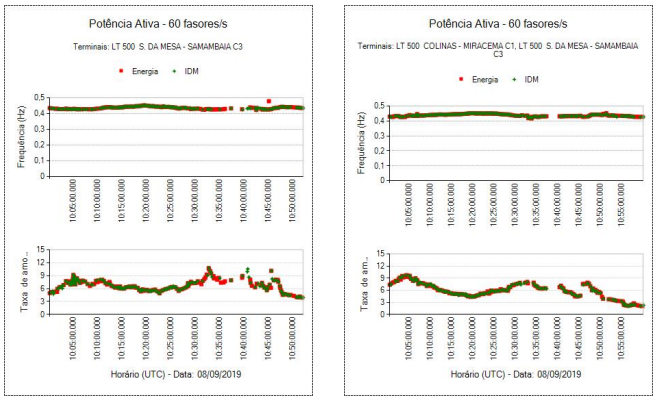

Figura 9. Modo validado pelo aplicativo, com um sinal (esquerda) e dois sinais de potência ativa (direita).

Os casos estudados nesta seção compreendem três tipos de sinais, frequência, defasagem angular de tensão e potência ativa. Como é observado, sinais de potência ativa apresentam melhores resultados, no entanto nem sempre está disponível ao usuário as medidas de corrente como neste caso de alta tensão. O sinal de frequência apresenta melhor desempenho que a diferença angular, pois permite obter os modos de interesse utilizando ordem menor, melhorando o desempenho computacional. Verifica-se também que escolher ordem do modelo 6 ou 8 já é possível identificar o modo de oscilação dominante. Aumentar o número de linhas por bloco tem como consequência maior quantidade de pontos validados.

5. ESTUDO DE APLICAÇÃO A SISTEMAS DE OUTROS PAÍSES

Nesta seção é apresentado o monitoramento dos modos de oscilação de sistemas elétricos de outros países. A comparação é feita entre dois conjuntos de parâmetros. O primeiro com ordem do modelo 6 e 20 linhas por bloco das matrizes de Hankel e o segundo, resultante da análise de variação de parâmetros da seção anterior. E por fim é observado o modo de oscilação real estimado pelo método de subespaço de estados, e como ele poderia ser apresentado, se fosse validado de acordo com a continuidade de pontos estimados e faixa de frequência de oscilação. Os casos estão descritos na Tabela 6.

Terminais de medição:

Tabela 6. Descrição dos sistemas monitorados.

Sistema	Período Hora (UTC)	Terminais de medição	Tipo do sinal
Argentina	10-12h 24/09/2018	UNT - UNCo	Frequência
Europa	15-17h 08/01/2019	ZHAW - ISE	Dif. angular

- Argentina: UNT em San Miguel de Tucumán (norte) e UNCo (centro) em Neuquén;
- Europa: ZHAW em Winterthur na Suíça e ISE em Faro, em Portugal.

Os sinais de frequência e diferença angular de tensão aplicados para estimação dos modos são apresentados nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

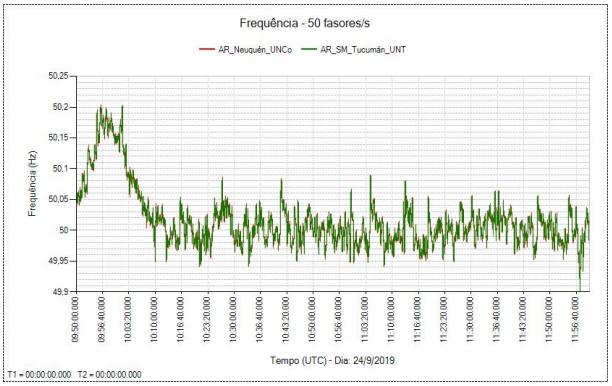

Figura 10. Sinal de frequência de UNT e UNCo na Argentina.

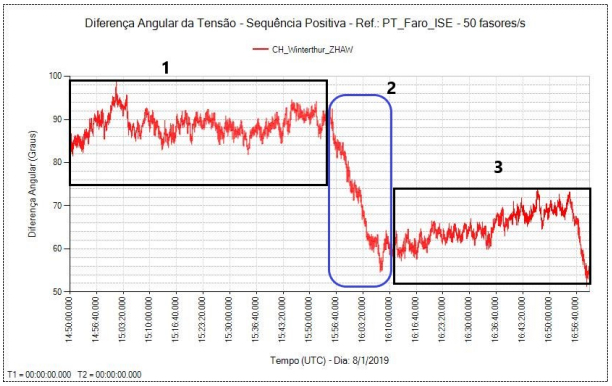

Figura 11. Diferença angular de tensão ZHAW (ref.ISE) Europa.

O sinal de diferença angular da Figura 11 pode ser dividido em 3 partes, sendo as partes 1 e 3, dados de ambiente. E a parte 2, de característica não estacionária. O método de subespaço de estados é empregado em sinais com dados de ambiente e pode apresentar resultados imprecisos no período que compreende a parte 2 do sinal. Métodos mais apropriados para sinais com *ringdown* podem ser aplicados, como o método Prony.

5.1 Simulação com parâmetros padrão

Na primeira etapa são definidos os parâmetros utilizados usualmente no aplicativo, ordem do modelo 6 e 20 linhas por bloco, além das janelas de dados de 10 minutos. Os resultados obtidos pelo aplicativo estão apresentados nas Figuras 12 e 13, respectivamente do sistema elétrico argentino e europeu entre a Suíça e Portugal.

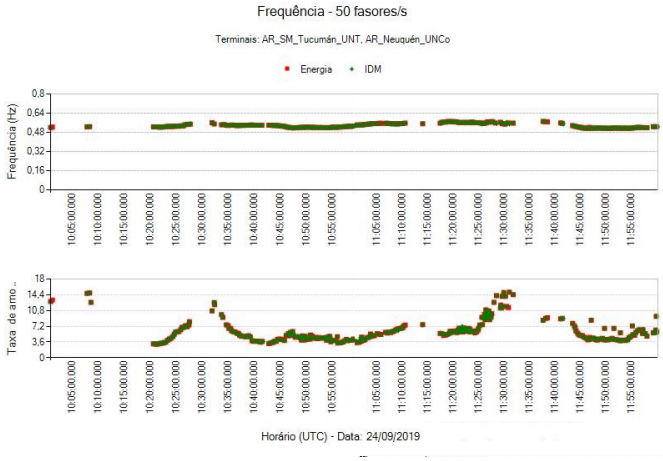

Figura 12. Modos de oscilação estimados pelo aplicativo MedPlot - Sistema elétrico da Argentina.

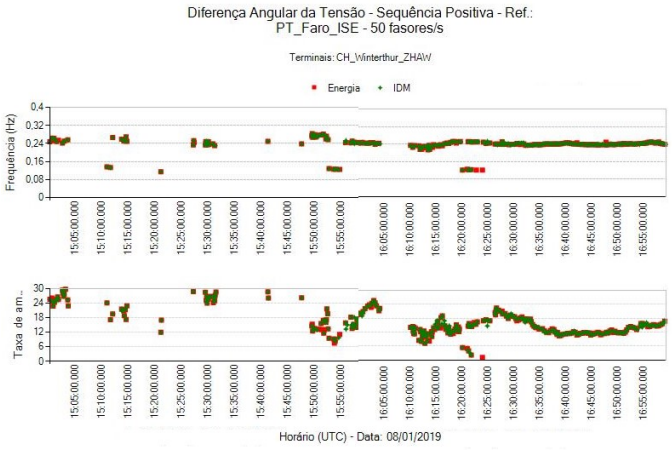

Figura 13. Modos de oscilação estimados pelo aplicativo MedPlot - Sistema elétrico Europa.

Os gráficos mostram alguns períodos sem validação dos modos, repetindo os mesmos problemas já apresentados anteriormente, a frequência de oscilação estimada pelo método de Welch e a ordenação pela pseudo-energia. A Tabela 7 apresenta a quantidade de pontos validados em relação aos pontos estimados pelo método de subespaço de estados.

Tabela 7. Pontos estimados e validados para simulação com ordem 6 e 20 linhas por bloco.

	Argentina	Europa
Pontos esperados	1440	1440
Pontos estimados	1434	1434
Pontos validados	792	496

5.2 Simulação com parâmetros recomendados

Nesta seção são apresentados os resultados de simulação utilizando os parâmetros que obtiveram melhor desempenho. O aumento no número de linhas por bloco para 80

melhora a quantidade pontos validados, pois o modo real concentra maior quantidade pontos com maior pseudo-energia. A Tabela 8 registra a quantidade de pontos esperados, estimados e validados para as simulações com ordem do modelo 6 e 80 linhas por bloco. Observa-se um aumento no número de pontos validados em relação a Tabela 7.

Tabela 8. Pontos estimados e validados para simulação com ordem 6 e 80 linhas por bloco.

	Argentina	**Europa**
Pontos esperados	1440	1440
Pontos estimados	1433	1401
Pontos validados	821	738

Alguns casos ainda apresentam períodos sem validação dos modos e os resultados não são apresentados pelo aplicativo.

5.3 Identificação do modo de oscilação real

São utilizados os mesmos parâmetros da seção anterior, ordem 6 e 80 linhas por bloco. O modo de oscilação real identificado nos casos do sistema argentino e europeu é apresentado nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

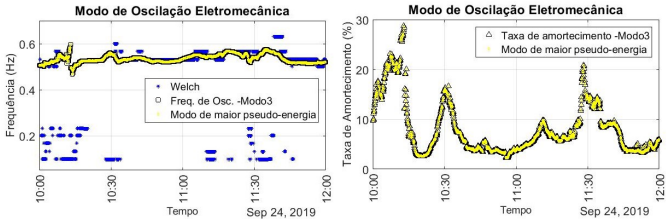

Figura 14. Modo de oscilação estimado pelo método CCA.

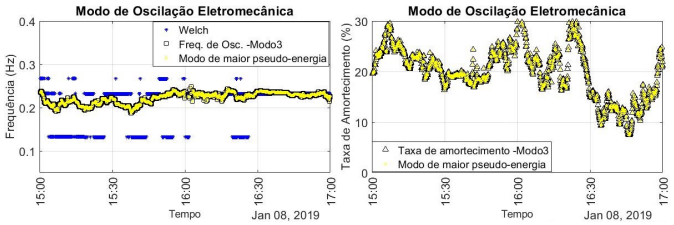

Figura 15. Modo de oscilação estimado pelo método CCA.

Os dois sistemas simulados apresentam a mesma característica em relação ao modo real (ou modo de interesse), o modo é identificado em todos os pontos estimados e permanece dentro de uma faixa de frequência de oscilação. O método de Welch não é considerado para a validação nesta etapa, pois assim como apresentado nos exemplos anteriores, a frequência de Welch varia entre alguns valores, prejudicando a validação da frequência obtida pelo método de subespaço. A pseudo-energia também prejudica a validação, pois em muitos pontos, indica um modo espúrio como dominante, afetando a escolha do modo real para a validação. No entanto, observa-se que a frequência estimada pelo método de subespaço está próxima a frequência de Welch, e também concentra a maior quantidade de modos com maior pseudo-energia (em amarelo nos gráficos).

6. CONCLUSÃO

Neste documento são apresentados resultados de investigação da variação de parâmetros para mapear os principais impasses em relação a validação de modos dominantes. Simulações utlizando ordem do modelo elevada, apresentam mais dificuldade em identificar quais modos são reais e quais são modos espúrios. A escolha de ordem do modelo igual a 6 e 8 mostrou-se mais adequada, principalmente para sinais de frequência e potência ativa. Ao utilizar 80 ou 100 linhas por bloco das matrizes de Hankel, o número de pontos validados aumenta. No entanto, os resultados ainda são prejudicados pelo método de Welch em alguns períodos, pois a frequência calculada não permite a validação do modo identificado corretamente pelo método de subespaço. Portanto, opta-se por utilizar o método de Welch para indicar qual modo deve ser rastreado entre os modos obtidos pelo método de subespaço, e não como um parâmetro de validação a cada janela. Entre todos os modos calculados pelo método CCA, o modo real é estimado continuamente, mantendo-se dentro de uma faixa de frequência durante todo o período. Além de observar o modo dominante, busca-se estratégias de validar todos os modos reais presentes no sinal, e descartar os modos espúrios.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES e ao INESC P&D Brasil através do Projeto MedFasee InFuse pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Favoreel, W., De Moor, B., and Van Overschee, P. (2000). Subspace state space system identification for industrial processes. *Journal of process control*, 10(2-3), 149–155.

Katayama, T. (2006). *Subspace methods for system identification*. Springer Science & Business Media.

Kundur, P., Balu, N.J., and Lauby, M.G. (1994). *Power system stability and control*, volume 7. McGraw-hill New York.

Leandro, R.B. (2014). *Identificação em tempo real de oscilações eletromecânicas utilizando sincrofasores*. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.

Pal, B. and Chaudhuri, B. (2006). *Robust Control in Power Systems*. Springer Science & Business Media.

Van Overschee, P. and De Moor, B. (2012). *Subspace identification for linear systems: Theory—Implementation—Applications*. Springer Science & Business Media.

Vanfretti, L., Bengtsson, S., and Gjerde, J.O. (2015). Preprocessing synchronized phasor measurement data for spectral analysis of electromechanical oscillations in the nordic grid. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 25(2), 348–358.

Vanfretti, L., Dosiek, L., Pierre, J.W., Trudnowski, D., Chow, J.H., García-Valle, R., and Aliyu, U. (2011). Application of ambient analysis techniques for the estimation of electromechanical oscillations from measured pmu data in four different power systems. *European Transactions on Electrical Power*, 21(4), 1640–1656.

Welch, P. (1967). The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, 15(2), 70–73.