



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GAT/26

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO – IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

MONITORAMENTO *ON-LINE* DOS PRINCIPAIS MODOS INTERÁREA DO SIN UTILIZANDO SINCROFASORES

Rodolfo Bialecki Leandro(*)

Ildemar Cassana Decker

Aguinaldo Silveira e Silva

Marcelo Neujahr Agostini

LabPlan - UFSC

RESUMO

Neste trabalho descreve-se o monitoramento *on-line* de alguns dos principais modos interárea do Sistema Interligado Nacional (SIN) a partir da aplicação de uma estratégia híbrida de identificação de modos de oscilação aplicada a sincrofases. A estratégia híbrida de identificação é composta pelo método de Welch e uma das variantes do método de subespaço de estados. Os resultados do trabalho estão organizados em três casos, permitindo a avaliação do desempenho da metodologia sob diferentes aspectos como: horizonte de tempo e simultaneidade de identificação de modos. Em um dos casos os resultados são validados por meio de comparações com os resultados da aplicação do método de Prony.

PALAVRAS-CHAVE

Oscilações eletromecânicas, modos interárea, sincrofases.

1.0 - INTRODUÇÃO

As oscilações eletromecânicas são fenômenos de ocorrência natural nos Sistemas de Energia Elétrica (SEE), devido a interações entre as máquinas síncronas que compõem o sistema (1)(2). O monitoramento contínuo dessas oscilações é essencial para a manutenção da segurança dinâmica dos SEE, de modo que se possa identificar e eliminar modos mal amortecidos através de ações de controle adequadas. Quando não amortecidas as oscilações podem resultar desde a deterioração de componentes do sistema até blecautes de grandes proporções (3).

Para realizar a identificação dos modos de oscilação do SEE, os estudos de estabilidade angular a pequenas perturbações tradicionalmente baseiam-se na aplicação de técnicas de sistemas lineares a um modelo matemático do SEE. Nas últimas duas décadas, técnicas de processamento de sinais e identificação de sistemas foram introduzidas como uma abordagem alternativa (4). Essas técnicas utilizam medidas de saída e (ou) entrada dos SEE a fim de estimar um modelo e consequentemente as características dos modos de oscilação presentes. O desempenho das técnicas depende da qualidade das medidas empregadas e, nesse sentido, os Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF) destacam-se devido à qualidade dos dados fornecidos. Isto porque os SMSF possuem altas taxas de varredura e sincronização temporal, o que permite o monitoramento da dinâmica de toda a área de um SEE em tempo real

Neste trabalho, realiza-se a identificação dos principais modos de oscilação interárea do Sistema Interligado Nacional (SIN) através da utilização de métodos baseados em medidas aplicados a sincrofases. A metodologia proposta para a identificação dos modos de oscilação consiste na aplicação do método de subespaço de estados a sinais no tempo, com uma etapa de validação dos resultados obtidos através da comparação com os resultados do método espectral de Welch. Os resultados obtidos permitem identificar as seguintes características dos modos de

(*) LabPlan / EEL / CTC / UFSC – CEP 88.040-900 – Florianópolis, SC, Brasil
Tel: (48) 3721-9731 – Email: rodolfobialeckileandro@gmail.com

oscilação: frequências, taxas de amortecimento e formas modais relacionadas a cada sinal de saída empregado na análise.

Este informe técnico está organizado da seguinte forma. Na seção 2 descreve-se o Sistema Nacional de Medição Fasorial Sincronizada em Baixa Tensão – MedFasee BT, cujas medidas fasoriais foram empregadas no monitoramento on-line dos modos interárea do SIN. Na seção 3 apresentam-se os métodos de subespaço de estados e de Welch empregados na identificação dos modos de oscilação. Na seção 4, descreve-se o aplicativo MedPlot RT do Projeto MedFasee, no qual está implementada a metodologia completa para a identificação de modos de oscilação empregada neste trabalho. Na seção 5 são apresentados os resultados selecionados do monitoramento contínuo dos principais modos interárea do SIN realizado com o aplicativo MedPlot RT.

2.0 - O SMSF MEDFASEE BT

O Projeto MedFasee BT é uma iniciativa acadêmica que possui atualmente 25 PMUs (*Phasor Measurement Unit*) instaladas em universidades de todas as regiões geográficas do Brasil. As PMUs monitoram as grandezas elétricas em níveis de baixa tensão e enviam os sincrofasores calculados pela rede de Internet a PDCs (*Phasor Data Concentrator*) instalados no LabPlan – UFSC e em servidores em nuvem (*Amazon Web Services - AWS*). A taxa de envio dos dados é de 60 pacotes por segundo, o que permite monitorar a dinâmica da rede. Na Figura 1 é possível visualizar a localização das instalações do SMSF MedFasee BT.

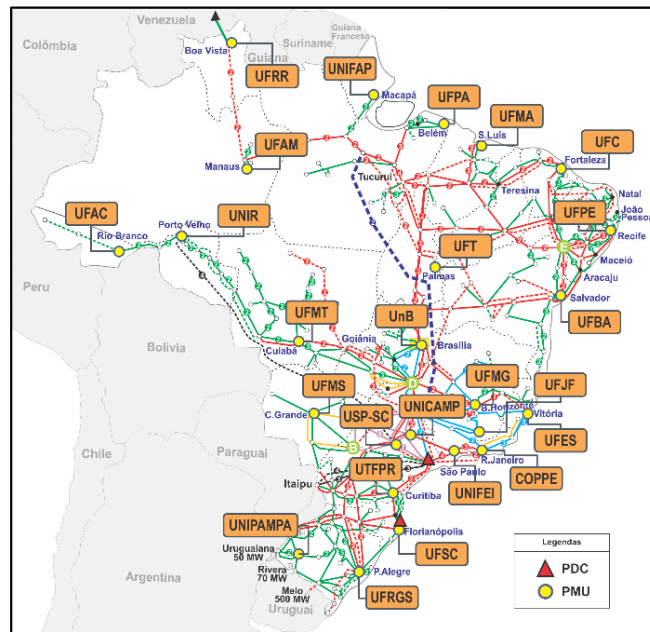


Figura 1 – Instalações do SMSF MedFasee BT.

3.0 - METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO DE MODOS ELETROMECHANICOS EMPREGADA

Neste trabalho, a identificação dos modos eletromecânicos é realizada através da aplicação de uma estratégia híbrida que envolve a aplicação de um método de subespaço de estados com uma etapa subsequente de validação com o emprego do método de Welch (5). Nas subseções a seguir, apresentam-se os algoritmos de ambos os métodos de maneira sucinta. Mais detalhes acerca das metodologias podem ser encontrados nas fontes citadas ao longo das subseções.

3.1 Método de Welch

O método de Welch (6) consiste em um algoritmo para o cálculo da densidade espectral de sinais por meio do emprego do algoritmo de FFT (*Fast Fourier Transform*). O processo pode ser resumido a três passos:

1. Considere-se $y(j)$ uma sequência de N amostras de um sinal discreto, com $j = 0, \dots, N - 1$. Secciona-se essa sequência em segmentos com comprimento igual a L , com seus inícios separados por D amostras, sendo que $D \leq L$. Com isso, admite-se sobreposição entre segmentos adjacentes, conforme ilustrado na Figura 2. Considerando K segmentos, tem-se:

$$y_1(j) = y(j), \quad j = 0, \dots, L - 1; \quad [1]$$

$$y_2(j) = y(j + D), \quad j = 0, \dots, L - 1. \quad [2]$$

Finalmente:

$$y_K(j) = y(j + (K - 1)D), \quad j = 0, \dots, L - 1. \quad [3]$$

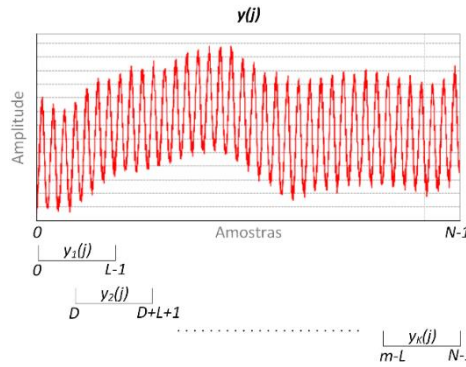


Figura 2 - Segmentação do Método de Welch.

2. Calculam-se periodogramas modificados de cada segmento formado. Para isso, seleciona-se uma janela de dados com coeficientes $w(j)$, sendo $j = 0, \dots, L-1$; e formam-se as sequências $y_1(j)w(j), \dots, y_K(j)w(j)$. Então, obtêm-se as transformadas de Fourier $A_1(n), \dots, A_K(n)$ dessas sequências, onde $n = 0, \dots, L/2$, por:

$$A_k(n) = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} y_k(j)w(j)e^{-2\pi i j n/L}, \quad [4]$$

onde $i = (-1)^{1/2}$. Finalmente, os K periodogramas modificados são obtidos pela seguinte equação:

$$I_k(f_n) = \frac{L}{U} |A_k(n)|^2, \quad k = 1, \dots, K; \quad [5]$$

onde

$$f_n = \frac{n}{L} \quad [6]$$

e

$$U = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} w^2(j) \quad [7]$$

No caso de uma janela retangular, por exemplo, $U = 1$.

3. O último passo consiste na obtenção da estimativa da densidade espectral, obtida como a média dos periodogramas:

$$\hat{P}(f_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K-1} I_k(f_n) \quad [8]$$

3.2 Métodos de subespaço de estados

Os métodos de subespaço de estados (7) têm sido utilizados amplamente na identificação de modos de oscilação em estruturas e em sistemas de energia (8). Essa família de métodos engloba vários algoritmos nos quais a realização em espaço de estados é diretamente obtida de medidas de entrada e saída do sistema. A denominação “métodos de subespaço de estados” remete ao fato de que os parâmetros lineares do sistema são estimados a partir dos subespaços linha ou coluna de matrizes formadas com essas medidas de entrada e saída (7).

Os métodos de subespaço mais utilizados são: *Numerical Algorithm for Subspace State Space System Identification* (N4SID), *Multivariable Output-Error State Space* (MOESP) e *Canonical Correlation Analysis* (CCA) (também referido como *Canonical Variate Analysis* - CVA). Esses algoritmos variam apenas quanto a duas matrizes de peso no processo. Essas matrizes multiplicam a matriz obtida por uma projeção ortogonal ou oblíqua (7).

A formulação desses métodos é extensiva e envolvente. Por isso, neste texto apresenta-se de forma sucinta os principais passos do algoritmo empregado (7)(9).

1. Tomando $M+1$ amostras de l saídas, formar a sequência de vetores de saída y_0, y_1, \dots, y_M , onde $y_k \in \mathbb{R}^{l \times 1}$ para $k = 0, \dots, M$. As matrizes bloco de Hankel estendidas são formadas como:

$$Y_p \equiv \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \dots & y_{j-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & \dots & y_{i+j-2} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{li \times j} \quad [9]$$

$$Y_f \equiv \begin{bmatrix} y_i & y_{i+1} & \dots & y_{i+j-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \dots & y_{2i+j-2} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{li \times j} \quad [10]$$

onde i (número de linhas de blocos) é um inteiro selecionado previamente ao menos maior que a ordem escolhida para o modelo n , e j é calculado por $j = M - 2i + 2$.

2. Calcular a projeção

$$O_i \equiv Y_f / Y_p \quad [11]$$

3. Calcular a decomposição em valores singulares da projeção ponderada

$$W_1 O_i W_2 = USV^T \quad [12]$$

onde W_1 e W_2 são matrizes de peso que dependem do método de subespaço de estados escolhido. Para o método CVA, empregado neste trabalho, W_1 é igual a $\Phi_{[Y_f, Y_p]}^{-1/2}$ (onde $\Phi_{[Y_f, Y_p]}$ é a matriz de covariância da matriz Y_f) e W_2 é uma matriz identidade.

4. Definir a ordem n do sistema como igual ao número de valores singulares significantes na matriz S . Particionar a decomposição em valores singulares da seguinte maneira

$$W_1 O_i W_2 = USV^T = [U_1 \quad U_2] \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \quad [13]$$

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. Calcular a matriz de observabilidade estendida por meio de

$$\Gamma_i = W_1^{-1} U_1 S_1^{1/2} \quad [14]$$

6. Obter as matrizes A e C a partir da matriz de observabilidade estendida

$$A = \Gamma_i^\dagger \bar{\Gamma}_i \quad [15]$$

$$C = \Gamma_i(1:l, :) \quad [16]$$

onde Γ_i e $\bar{\Gamma}_i$ são iguais a matriz de observabilidade estendida Γ_i , sem as últimas l linhas e sem as primeiras l linhas, respectivamente; e o símbolo (\dagger) representa a pseudoinversa de uma matriz.

7. O interesse está nos autovalores da matriz de estados A , a partir dos quais são obtidos os modos de oscilação comuns aos sinais formados pelos vetores de saída y_0, y_1, \dots, y_M . Assim, considerando um autovalor λ , representado por um par de complexos conjugados na forma:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad [17]$$

A frequência de oscilação, em Hertz, do modo é obtida a partir da componente imaginária do autovalor, por meio de (1):

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad [18]$$

A taxa de amortecimento do modo pode ser encontrada utilizando (1):

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad [19]$$

Após a aplicação do algoritmo de identificação por subespaço de estados, deve-se definir, entre os modos estimados, qual é o modo dominante do sistema. Neste trabalho, a caracterização do modo dominante estimado pelo método CVA é feita por meio do cálculo da pseudoenergia (8) e do Índice de Dominância Modal (IDM) (10).

4.0 - O APLICATIVO MEDPLOT RT

O aplicativo MedPlot RT é uma ferramenta para o monitoramento em tempo real de medidas de SMSF (11). Os principais processos realizados pelo aplicativo são ilustrados na Figura 3. Uma descrição sucinta acerca de cada processo é apresentada a seguir:

Aquisição de dados: o aplicativo recebe um fluxo de dados em tempo real enviado por um PDC de acordo com a norma IEEE C37.118-2/2011 (12). O protocolo de comunicação é o UDP (*User Datagram Protocol*), ideal para aplicações em tempo real por não se ater a tratamento de erros e a eventuais perdas de dados.

Interpretação/Organização dos dados: os pacotes recebidos no fluxo podem ser de configuração ou de dados. Os pacotes de configuração são enviados a certos intervalos de tempo e servem para mapear o conteúdo dos pacotes de dados. A partir disso, as medidas fasoriais monitoradas pelas PMUs são extraídas e organizadas convenientemente por terminal de medição para a realização de análises.

Monitoramento de grandezas fasoriais no tempo: o monitoramento das grandezas fasoriais é orientado por terminal de medição para facilitar as análises. O usuário pode gerar gráficos polares e no tempo. Entre as opções de gráficos no tempo estão: módulos de tensões e correntes, diferenças angulares, frequências e potências ativas e reativas. Com os gráficos polares é possível visualizar diferenças angulares e identificar ilhamentos com maior clareza.

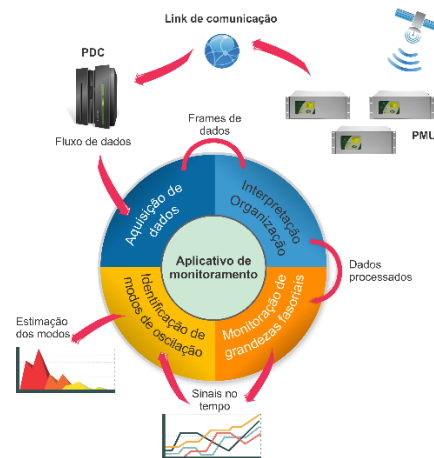


Figura 3 - Diagrama ilustrativo do aplicativo MedPlot RT.

Identificação de modos de oscilação: as metodologias de identificação de modos de oscilação são aplicadas nos sinais temporais gerados na etapa de monitoramento de grandezas fasoriais. Para a obtenção de melhores desempenhos das técnicas de identificação, primeiramente os sinais são submetidos a uma etapa de pré-processamento. Após essa etapa, dois métodos de identificação de modos de oscilação são aplicados: o método de subespaço de estados CVA e o método de Welch. Por fim, os resultados obtidos com os dois métodos são comparados em uma etapa de validação.

5.0 - RESULTADOS DE APLICAÇÃO

Nesta seção são apresentados diversos resultados da utilização do aplicativo MedPlot RT no monitoramento *on-line* dos principais modos interárea do SIN. Na Tabela 1 encontram-se as faixas de frequências típicas dos principais modos interárea do SIN (13). Neste ponto, vale ressaltar que as faixas de frequência servem como orientação na identificação dos modos, no entanto, as configurações topológicas e de despacho do sistema podem alterar sensivelmente esses valores.

Tabela 1 - Principais modos interárea do SIN.

Modo	Frequência (Hz)
Norte-Sul	0,2 – 0,4
Sul-Sudeste	0,6 – 0,8
Norte-Nordeste	0,55 – 0,65
Acre/Rondônia-SIN	0,4 – 0,7

Em todas as análises foram utilizados os seguintes parâmetros para a aplicação do método de subespaço de estados: ordem igual a 8; número de linhas por bloco das matrizes de Hankel igual a 20; janela de análise com 10 minutos. O método de Welch possui parâmetros fixos no aplicativo, dividindo cada janela de 10 minutos em 20 segmentos com sobreposição de 50% entre segmentos adjacentes. Nos gráficos dos resultados a seguir são apresentadas as estimativas de frequência e taxa de amortecimento considerando a ordenação modal pelo cálculo da pseudo-energia (pontos em vermelho) e do IDM (pontos em verde). Os valores de média e desvio-padrão apresentados referem-se ao conjunto de estimativas obtido com a ordenação por pseudo-energia (valores muito similares foram obtidos com ordenação por IDM e, por isso, foram omitidos).

5.1 Caso I: Identificação simultânea de modos interárea do SIN

Neste primeiro caso apresenta-se a identificação simultânea de três modos interárea do SIN: Norte-Sul (N-S), Norte-Nordeste (N-NE) e Acre/Rondônia-SIN (AC/RO-SIN). O período monitorado foi de 14:00 às 15:00 (UTC) do dia 17/03/2017. As frequências e taxas de amortecimento dos três modos podem ser visualizadas na Figura 4.

Os sinais monitorados para a identificação do modo Norte-Sul foram as diferenças angulares entre UFPA e UFRGS em relação ao terminal UnB, utilizado como referência. As estimativas de frequência estão dentro da faixa de valores esperada (0,2 Hz a 0,4 Hz, conforme a Tabela 1), com valor médio igual a 0,38 Hz e desvio-padrão inferior a 4×10^{-3} Hz. O amortecimento estimado teve valor médio igual a 10% e desvio-padrão de 1,4%, conforme mostra a Figura 4.a.

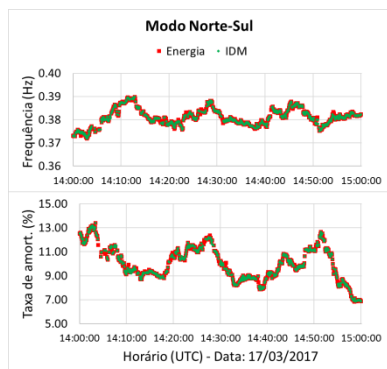


Figura 4.a – Caso I: Modo N-S.

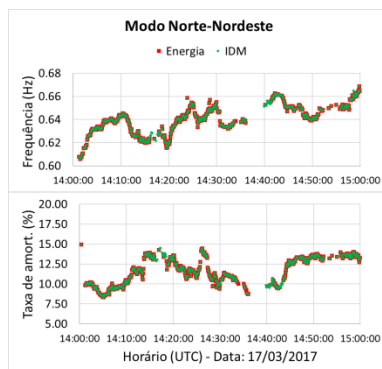


Figura 4.b – Caso I: Modo N-NE.

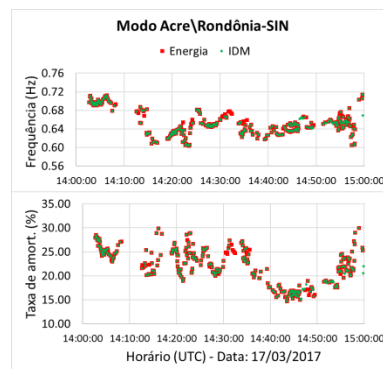


Figura 4.c – Caso I: Modo AC/RO-SIN.

No caso do modo Norte-Nordeste, os sinais de diferenças angulares entre UFPA e UFBA em relação ao terminal UFC foram os escolhidos. A frequência identificada teve valor médio de 0,64 Hz e desvio-padrão de $1,6 \times 10^{-2}$ Hz, enquanto o amortecimento apresentou valor médio de 11,6% e desvio-padrão de 1,6%. Por alguns minutos, entre 14:36 até 14:40, a metodologia utilizada não conseguiu identificar o modo de oscilação. No entanto, no restante do intervalo a identificação do modo e as variações de suas características foram claras.

Por fim, a identificação do modo Acre/Rondônia-SIN foi realizada com a utilização dos sinais de diferenças angulares entre UNIR e UnB em relação ao terminal UFMT. A frequência identificada teve média de 0,65 Hz e desvio-padrão de $3,5 \times 10^{-2}$ Hz, enquanto que o amortecimento apresentou valor médio de 22% e desvio-padrão de 4,1%. A metodologia empregada na identificação apresentou maiores dificuldades na identificação deste modo, com estimativas mais dispersas (desvios-padrão maiores que para os outros modos) e até mesmo ausência de identificação em alguns pontos. As elevadas taxas de amortecimento estimadas sinalizam que o modo em questão não se encontrava suficientemente excitado no período analisado e, por isso, teve sua identificação deteriorada em certos momentos.

Na Tabela 2 estão reunidos os valores médios obtidos para cada modo de oscilação monitorado. Os valores médios das frequências dos três modos encontram-se nas faixas de valores apresentadas na Tabela 1. Vale mencionar que foi realizado o monitoramento de sinais para a identificação do modo Sul-Sudeste, neste e nos demais casos. No entanto, não foi possível realizar sua identificação com clareza e, por isso, os resultados foram omitidos. Uma provável justificativa é a baixa excitação do modo nos períodos monitorados.

Tabela 2 – Caso I: Frequências e taxas de amortecimento médias.

Modo	Frequência (Hz)	Taxa de amort. (%)
Norte-Sul	0,38	10,0
Norte-Nordeste	0,64	11,6
Acre/Rondônia-SIN	0,65	22,0

5.2 Caso II: Identificação simultânea em período estendido

Neste Caso II, utiliza-se um período de análise mais extenso a fim de exemplificar a robustez da metodologia empregada neste trabalho. O período total monitorado é de 8 horas, das 13:00 às 21:00 de 03/03/2017. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.

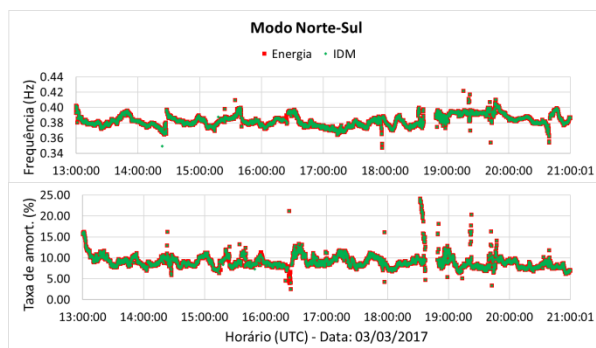


Figura 5.a – Caso II: Modo N-S.

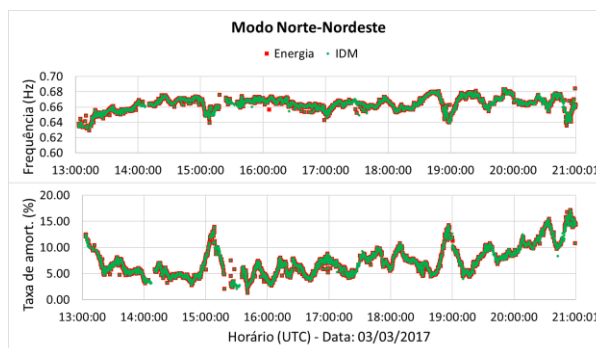


Figura 5.b – Caso II: Modo N-NE.

Nesta análise, os sinais monitorados na identificação do modo Norte-Sul foram as diferenças angulares entre UFPA e UFSC em relação ao terminal UnB. Na Figura 5.a, pode-se verificar com clareza a evolução da frequência e da taxa de amortecimento do modo. Percebe-se em alguns pontos específicos uma certa dispersão (sobretudo em torno de 18:30), mas na maior parte do período analisado as estimativas encontram-se coerentes com suas

vizinhanças. O modo apresentou frequências em torno do valor médio de 0,38 Hz – assim como no Caso I – com desvio-padrão de $7,8 \times 10^{-3}$ Hz e amortecimento com valor médio de 9% e desvio-padrão de 1,68%.

No caso do modo Norte-Nordeste foram monitoradas as diferenças angulares entre UFAM e UNIFAP com relação à UFBA. Assim como para o modo Norte-Sul, pode-se identificar com clareza a evolução da frequência e taxa de amortecimento do modo ao longo do período. A frequência do modo Norte-Nordeste teve valor médio igual a 0,66 Hz e desvio-padrão de $8,5 \times 10^{-3}$ Hz, enquanto o amortecimento teve valor médio de 6,9% e desvio-padrão de 2,7%.

5.3 Caso III: Identificação em período com perturbação de maior porte

Por fim, realiza-se a análise de um período com a presença de uma perturbação de maior porte, com oscilações de maior amplitude. As oscilações observadas são apresentadas na Figura 6.a. A figura em questão apresenta também os resultados da aplicação do método de Prony aos sinais, com os sinais estimados através de um processo de reconstrução apresentados com linhas pontilhadas (todos os sinais estimados estão sobrepostos pelos sinais originais, o que significa que a estimativa está precisa). O modo dominante encontrado na análise tem frequência igual a 0,417 Hz e 9,84 % de taxa de amortecimento.

Na Figura 6.b, apresentam-se as formas modais do modo dominante com relação aos sinais utilizados na análise. Percebe-se claramente a oposição de fase entre os terminais das diferentes regiões, comprovando o caráter interárea do modo.

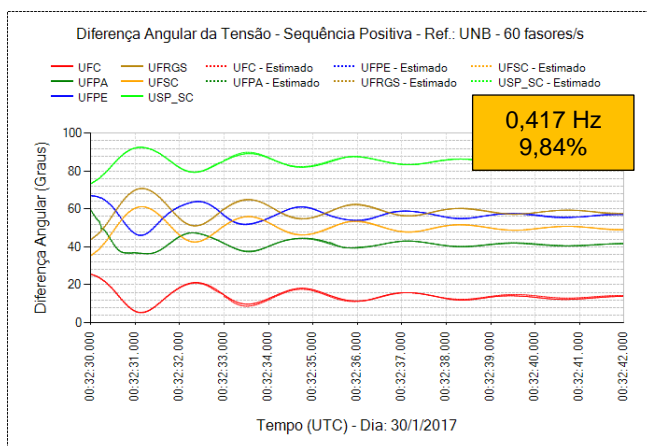


Figura 6.a - Caso III: Identificação com Método de Prony.

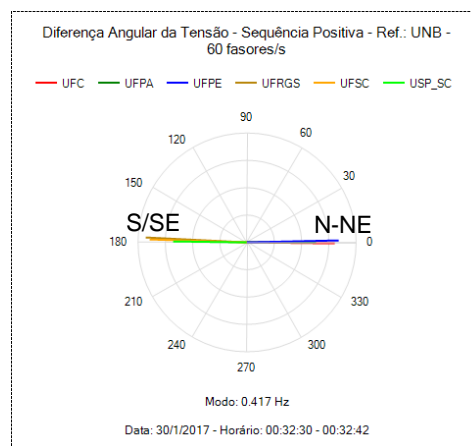


Figura 6.b - Caso III: Formas modais.

Para verificar o desempenho da metodologia de subespaço de estados com validação pelo método de Welch, realizou-se a análise de um período de uma hora em torno do instante no qual ocorreram as oscilações de maior porte. Na Figura 7.a, encontram-se os sinais de diferenças angulares entre os terminais UFRGS e UNIPAMPA em relação ao terminal UFPE empregados na análise. Na Figura 7.b, está o resultado do monitoramento.

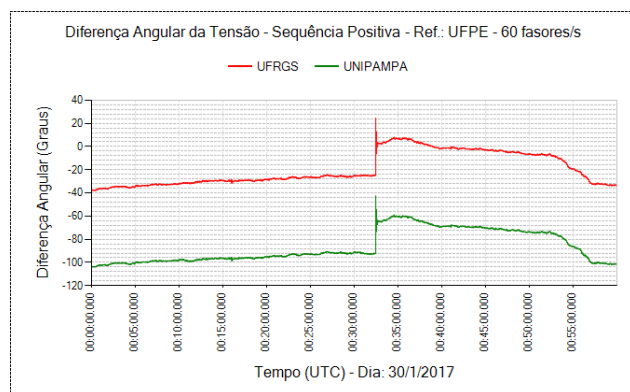


Figura 7.a - Caso III: Sinais monitorados.

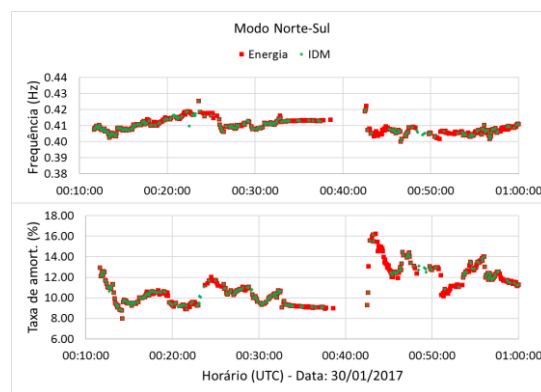


Figura 7.b - Caso III: Modo Norte-Sul.

Os resultados em termos de valores de frequência e taxa de amortecimento são similares aos casos anteriores nos quais o modo Norte-Sul foi identificado. O destaque neste caso é que no horário próximo às oscilações de maior amplitude (as oscilações têm início às 00:32:30, conforme mostra a Figura 6.a), a frequência estimada é de 0,41 Hz e a taxa de amortecimento de 9%, valores bem similares aos obtidos com o método de Prony anteriormente. Como a janela de análise é de 10 minutos esses valores permanecem presentes por alguns minutos nos gráficos de resultados devido à forte influência das oscilações.

No entanto, este tipo de oscilação também pode deteriorar a estimativa, afinal o método de subespaço busca representar o sistema por meio de um modelo linear em torno de um ponto de operação. Uma perturbação de

maior porte invalida a hipótese admitida pelo método. Por isso, por volta das 00:40 percebe-se ausência de identificação do modo por parte da metodologia.

6.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados três casos de monitoramento *on-line* de alguns dos principais modos interárea do SIN. O monitoramento foi realizado com a aplicação de uma metodologia híbrida de identificação - método de subespaço de estados CVA e método de Welch – implementadas no aplicativo MedPlot RT do Projeto MedFasee.

No Caso I, pôde-se constatar o bom desempenho da metodologia na identificação simultânea de modos de oscilação. Escolhas convenientes de sinais nas análises podem melhorar ou deteriorar a identificação. Por isso, o conhecimento da configuração do sistema elétrico é essencial a fim de fazer a melhor escolha de sinais em termos de observabilidade dos modos.

O Caso II foi utilizado para verificar a robustez da metodologia em longos intervalos de tempo. Os modos Norte-Sul e Norte-Nordeste foram monitorados ao longo de 8 horas. Com isso, foi possível verificar a evolução das características de frequência e taxa de amortecimento ao longo do tempo.

Por fim, no Caso III, a metodologia empregada teve seus resultados comparados com os resultados do método de Prony. Para isso, foi escolhido um período com a presença de oscilações de maior amplitude, em decorrência de uma eventual mudança topológica. Os resultados mostraram coerência entre ambos os métodos, ainda que a aplicação do método de subespaço de estados não seja adequada a períodos com grandes perturbações.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KUNDUR, P. Power System Stability and Control, p. 18 – 26. New York: McGraw-Hill Professional, 1994.
- (2) DOSIEK, L. A. Estimating power system electromechanical modes and mode shapes using modern system identification techniques. Tese (Ph.D.) – University of Wyoming, Laramie, WY, 2010.
- (3) LIU, G.; QUINTERO, J.; VENKATASUBRAMANIAN V. Oscillation monitoring system based on wide area synchrophasors in power systems. In: Bulk Power System Dynamics and Control – VII. Revitalizing Operational Reliability, IREP Symposium, p. 1 – 13, Charleston, SC, USA, aug. 2007.
- (4) PRIOSTE, F. B.; e SILVA, A. S.; DECKER, I. C. Monitoring oscillations modes of the Brazilian interconnected power system using ambient data. In: PowerTech, 2011 IEEE Trondheim. Trondheim, 2011. p. 1 – 7.
- (5) LEANDRO, R. B.; e SILVA, A. S.; DECKER, I. C.; AGOSTINI, M. N. Identification of the Oscillation Modes of a Large Power System Using Ambient Data. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, v. 26, n. 4, p. 441 – 453, aug. 2015.
- (6) WELCH, P. D. 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, v. 15, n. 2, p. 70 – 73, jun. 1967.
- (7) OVERSCHEE, P. v. Subspace Identification for Linear Systems: Theory – Implementation – Applications. Boston: Springer, 2011.
- (8) TRUDNOWSKI, D. J.; PIERRE, J. W.; ZHOU, N.; HAUER, J. F.; PARASHAR, M. Performance of Three Mode-Meter Block-Processing Algorithms for Automated Dynamic Stability Assessment. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 2, May 2008, pp. 680 – 690.
- (9) ZHOU, N.; PIERRE, J.; HAUER, J. Initial results in power systems identification from injected probing signals using a subspace method. IEEE Transactions on Power Systems, v. 21, n. 3, p. 1296 – 1302, aug. 2006.
- (10) AGUIRRE, L. Quantitative measure of modal dominance for continuous systems. In: Proceedings of the 32nd. IEEE Conference on Decision and Control, vol. 3, p. 2405 – 2410, dec. 1993.
- (11) LEANDRO, R. B.; DECKER, I. C.; e SILVA, A. S.; AGOSTINI, M. N.; JEREMIAS, T. Identificação em tempo real de oscilações eletromecânicas utilizando sincrofasores. In: XXIII SNPTTE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu, 2015.
- (12) IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems. IEEE Std C37.118.2-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005), p. 1 – 53, dez 2011.
- (13) ONS. Informativo ONS - Ano I, n. 7. jan. 2010. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/newsletters/informativos/jan2010/07- materia01.html>>.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rodolfo Bialecki Leandro é graduado em Engenharia Elétrica e mestre em Sistemas de Energia Elétrica pela UFSC (2011 e 2014, respectivamente). Atualmente, atua como pesquisador junto ao LabPlan – UFSC desenvolvendo aplicações para sistemas de medição sincronizada de fasores.

Ildemar Cassana Decker é graduado em Engenharia Elétrica pela UFPEL (1980), mestre (1984) e doutor em Sistemas de Energia Elétrica (1993) pela UFSC e pela UFRJ respectivamente. Desde 1985 é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC. Suas áreas principais de interesse são métodos computacionais para análise e controle de sistemas de energia elétrica e o desenvolvimento e aplicação de sistemas de medição sincronizada de fasores.

Aguinaldo Silveira e Silva possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFPR (1977), mestrado em Engenharia Elétrica pela UFSC (1982) e doutorado pela University of Manchester Institute of Science and Technology (1990). Atualmente é professor titular da UFSC, tendo como principais áreas de interesse: controle e estabilidade de SEE, projeto de controladores para dispositivos FACTS, estabilidade de tensão, controle robusto aplicado a SEE e aplicação de computação algébrica a SEE.

Marcelo Neujahr Agostini é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, 1996) e doutor em Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC, 2002). Participa do Projeto MedFasee desde 2002, suas áreas principais de interesse são: medição fasorial sincronizada, modelagem e dinâmica de sistemas elétricos, modelagem orientada a objetos, engenharia de software e computação de alto desempenho aplicadas a sistemas elétricos.