

IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS OPERACIONAIS MISTOS EM MÁQUINAS ROTATIVAS USANDO O MAPA DE ORDEM DIRECIONAL

Alexandre Luiz Amarante Mesquita

Departamento de Eng. Mecânica, Universidade Federal do Pará, alexmesq@ufpa.br
Doutorando na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas

Sérgio Junichi Idehara

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP
junichi@fem.unicamp.br

Milton Dias Jr.

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP
milton@fem.unicamp.br

Resumo. Neste trabalho, a técnica de análise de ordem TVDFT (Time Variant Discrete Fourier Transform) é utilizada para tratar sinais complexos e não-estacionários, gerados a partir dos sinais reais medidos. A técnica é aplicada a uma bancada rotor-eixo-mancais para diversas rampas de velocidade de rotação de forma a identificar, ao longo da rotação, as componentes de precessão direta e retrógrada no mapa de ordem direcional, o qual mostra ordens negativas (relacionadas às componentes de precessão retrógradas) e ordens positivas (relacionadas às componentes diretas). Os mapas de ordens direcionais são obtidos para algumas estações ao longo do rotor e eixo, desta forma possibilitando identificar a directividade das órbitas destas estações e, conseqüentemente, verificar a ocorrência dos modos operacionais mistos, um tipo especial de movimento que ocorre quando, simultaneamente, algumas estações precessionam na direção direta e outras precessionam na direção retrógrada.

Palavras-chave: vibrações, dinâmica de rotores, modos operacionais, análise de ordem.

1. INTRODUÇÃO

O modo operacional misto é um tipo especial de movimento que ocorre quando algumas estações de um sistema rotativo possuem movimentos de precessão direta e outras possuem movimentos de precessão retrógrada simultaneamente. Dias Jr e Allemang (2000) discutem o fenômeno mostrando casos de simulação numérica. Dias Jr et al. (2002) e Miranda et al. (2002) observaram experimentalmente a existência de modos operacionais mistos para um rotor contendo dois discos sendo que o primeiro mostrou numericamente quais os parâmetros que influenciam no surgimento, ou não, do fenômeno. Tais parâmetros são a amplitude e a distribuição espacial do desbalanceamento, a anisotropia dos mancais, o efeito giroscópico e o amortecimento nos mancais.

Para se identificar experimentalmente as faixas de frequência em que ocorrem os modos mistos é vantajoso obter resultados prévios de simulações numéricas (Dias Jr et al., 2002). Sem a informação de modelos numéricos, a identificação experimental torna-se um processo demorado, sendo realizado por tentativas. Neste trabalho é proposto um método para se identificar estas faixas de frequências de uma maneira mais eficaz. O método é baseado na análise do mapa de ordem direcional (mapa de ordens negativas e positivas) do sistema, ou seja, analisa-se o movimento do

sistema, descrito por coordenadas complexas, durante sua partida através da aplicação da técnica de *order tracking* em sinais complexos.

2. MÉTODOS SEGUIDORES DE ORDEM (*ORDER TRACKING METHODS*)

Componentes harmônicas do sinal de vibração de uma máquina rotativa, operando em rotação constante, surgem como picos no espectro desta máquina. Esses picos correspondem a frequências de ressonância ou frequências de excitações cíclicas, que geralmente são múltiplas da rotação do eixo.

Para uma máquina com velocidade variável, espectros podem ser obtidos em função da rotação do eixo. Estes podem ser agrupados em um único gráfico tridimensional denominado de mapa espectral ou diagrama em cascata (*waterfall plot*). Contudo, para sinais não-estacionários, o conteúdo espectral é variante no tempo e a análise espectral usando a tradicional FFT geralmente não apresenta bons resultados. Efeitos de *aliasing* e espalhamento (*smearing*) podem surgir.

O problema de *aliasing* ocorre quando o intervalo de discretização, Δt , é muito grande, implicando uma baixa taxa de amostragem. Para não ocorrer este efeito, é necessário que a taxa de amostragem, f_s , seja no mínimo duas vezes o valor da mais alta frequência contida no sinal, f_{max} . Esta condição é conhecida como teorema de Nyquist-Shannon. Ao se analisar sinais de vibração medidos, por exemplo, durante a partida de uma máquina, o fenômeno de *aliasing* pode ocorrer se a taxa de amostragem for mantida constante. Neste caso, as frequências contidas no sinal irão aumentando com o aumento da rotação, podendo então ultrapassar o valor limite de não ocorrência de *aliasing*. O espalhamento é o resultado da aplicação da FFT em um sinal não-estacionário, cujo conteúdo espectral é representado por uma banda de frequência e a amplitude surge reduzida.

Uma maneira de se usar efetivamente a FFT em sinais de vibração de rotores com velocidade variável é através da sincronização da taxa de amostragem com a rotação do eixo. Neste caso o sinal no domínio do tempo pode ser visualizado no domínio do ângulo de revolução, sendo, neste domínio, um sinal estacionário.

Exemplos de amostragens no domínio do tempo e no domínio do ângulo são apresentadas na Fig. (1). Na Fig. (1a), a frequência de um sinal senoidal é constante ao longo do tempo. Assim, uma amostragem no tempo com intervalo de discretização constante, Δt , resulta numa amostragem no domínio do ângulo de revolução ($\Delta\theta$) também constante. Neste caso, em ambos os domínios, o sinal é estacionário e pode-se aplicar a FFT sem incorrer em erros, por exemplo, na análise espectral de máquinas com velocidade de rotação constante.

Na Fig.(1b), a frequência do sinal senoidal é variável (linearmente crescente) no tempo. Se a amostragem for feita com um Δt constante, isto resulta em $\Delta\theta$ não constante e o sinal continuará a ser não estacionário em ambos os domínios. No entanto, se a taxa de amostragem for sincronizada com a frequência do sinal, os intervalos de tempo Δt serão variáveis (Fig. (1c)), mas $\Delta\theta$ será constante e então o sinal será estacionário no domínio do ângulo de revolução.

O sinal amostrado de forma síncrona com a rotação terá suas amostras localizadas nas mesmas posições na forma de onda do sinal, em um ciclo de revolução. Então, cada intervalo entre as amostras no domínio do tempo corresponde a um mesmo incremento de ângulo de revolução.

No mapa espectral de um sinal com taxa de amostragem sincronizada com a frequência do sinal, por exemplo, o sinal de vibração de uma máquina cuja taxa de amostragem esteja sincronizada com a rotação da mesma, os harmônicos da rotação estarão indicados por linhas retas inclinadas no mapa espectral (Fig. (2)). Para se ter a sincronização do sinal de vibração com a velocidade de rotação da máquina é necessário medir os valores instantâneos da velocidade do eixo. Tradicionalmente isto é feito usando um tacômetro como referência, que consiste de um sinal com um ou vários pulsos a cada revolução.

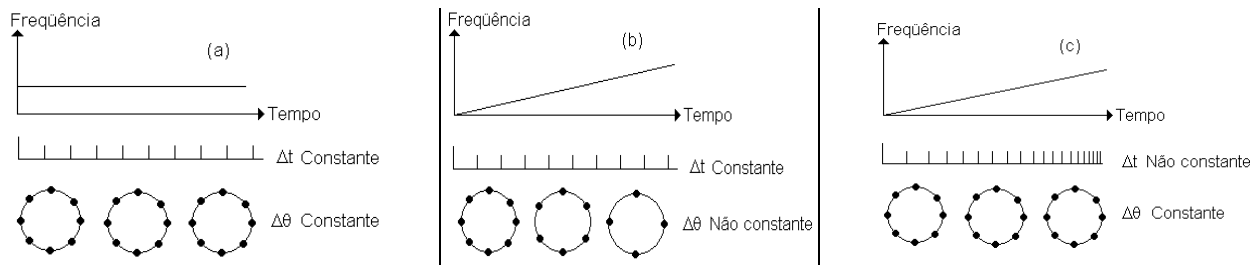


Figura 1. (a) Frequência constante do sinal e amostragens nos domínios do tempo e do ângulo constantes; (b) Frequência variável com amostragem no tempo constante resultando numa amostragem no domínio do ângulo variável; (c) Frequência variável com amostragem no tempo variável e no domínio do ângulo constante (Blough, 1998).

A partir deste mapa espectral, pode-se obter uma curva de cada ordem individual em função da rotação. Entretanto, ao invés de visualizar as componentes do sinal no domínio da frequência, as componentes podem ser visualizadas no domínio da ordem. Ordens são múltiplos da frequência de rotação do eixo e a análise de vibração no domínio da ordem é chamada Análise de Ordem. O gráfico tridimensional com ordens ao invés de frequências em Hz, na abscissa, denomina-se mapa espectral de ordem ou simplesmente mapa de ordem (Fig. (3)). Este gráfico é o mesmo da Fig. (2), com a diferença que o eixo das abscissas é normalizado pela frequência de rotação.

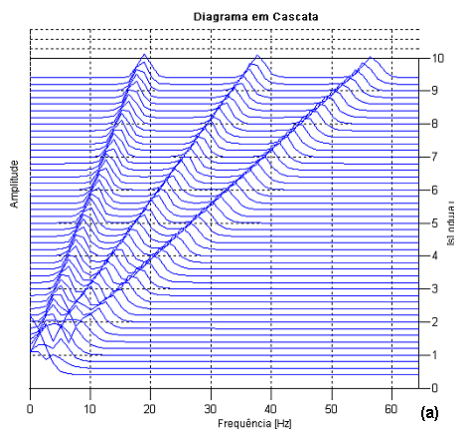


Figura 2. Diagrama em cascata.

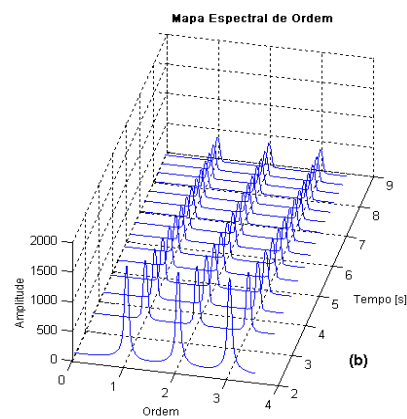


Figura 3. Mapa espectral de ordem.

Neste mapa de ordem as informações de frequências que não dependam da velocidade de rotação (tal como as frequências naturais) surgirão como linhas inclinadas e as frequências síncronas com a rotação ou a sua harmônica – frequências devido ao desbalanceamento, desalinhamento, etc. – surgirão como linhas retas verticais (paralelas ao eixo da rotação em rpm), tornando mais fácil a identificação destas componentes.

Como já mencionado anteriormente, cada ordem pode ser isolada, em função da rotação do eixo. Em outras palavras, a magnitude e fase de cada ordem individualmente podem ser determinadas em função da rotação (ou do tempo). Este processo de determinação do mapa de ordem e conseqüentemente a determinação da magnitude e fase das ordens é definido como *order tracking*.

As expressões de amostragem no domínio do ângulo de revolução e no domínio da ordem são semelhantes às expressões de amostragem nos domínios do tempo e da frequência. Sinais que são periódicos no domínio do tempo aparecem como picos no espectro de frequências. Na *order tracking* a FFT transforma dados no domínio do ângulo de revolução para dados no domínio de ordens, criando um espectro de ordem. Sinais que são periódicos no domínio do ângulo de revolução aparecerão como picos no domínio da ordem. Por exemplo, se um pico de vibração ocorre duas vezes a cada revolução na mesma posição do eixo, este pico surgirá na segunda ordem no espectro de ordem.

As equações de amostragem escritas no domínio do tempo e frequência são dadas por:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \geq 2f_{\max} \quad T = N \times \Delta t \quad \Delta f = \frac{1}{T} = \frac{1}{N \times \Delta t} \quad (1)$$

sendo:

$f_s \rightarrow$ frequência de amostragem (taxa de amostragem) do sinal em [Hz];

$\Delta t \rightarrow$ intervalo de discretização em [s];

$f_{\max} \rightarrow$ frequência máxima do sinal em [Hz];

$T \rightarrow$ tempo total de análise (*time record*) em [s];

$N \rightarrow$ número de amostras no tempo (tamanho do bloco de dados); e

$\Delta f \rightarrow$ resolução em frequência do espectro resultante da FFT em [Hz].

Nos domínios do ângulo de revolução e da ordem, as equações de amostragem são dadas de forma similar por:

$$O_s = \frac{1}{\Delta \theta} \geq 2 O_{\max} ; \quad R = N \times \Delta \theta ; \quad \Delta O = \frac{1}{R} = \frac{1}{N \times \Delta \theta} ; \quad \Delta \theta \cdot O_{\max} = \Delta t \cdot f_{\max} \quad (2)$$

sendo:

$O_s \rightarrow$ ordem de amostragem (taxa de amostragem angular) do sinal;

$\Delta \theta \rightarrow$ intervalo angular das amostras em [rev];

$O_{\max} \rightarrow$ ordem máxima a ser analisada;

$R \rightarrow$ número total de revoluções que são analisadas em [rev];

$N \rightarrow$ número de amostras; e

$\Delta O \rightarrow$ espaçamento no espectro de ordem resultante da FFT.

A transformada de Fourier aplicada no sinal no domínio do ângulo resulta em um espectro com resolução ΔO constante; e qualquer ordem que tenha um número inteiro de ciclos contido em R se situará em uma linha espectral ΔO , evitando assim o *leakage*. Erro que ocorre em um pico de um espectro quando o sinal no domínio do tempo não contém um número inteiro de ciclos dentro do período de análise. Este efeito faz com que a energia do pico seja espalhada em linhas espectrais adjacentes e a amplitude seja reduzida (Ewins, 1984; Maia e Silva, 1997).

Os métodos de *order tracking* baseado na reamostragem digital são os métodos mais comumente implementados em analisadores de sinais comerciais (Blough, 1998). Recentemente, novos métodos foram desenvolvidos, tais como os métodos baseados no filtro de Kalman (Vold e Leuridan, 1993; Vold, 1997) e o método da TVDFT (*Time Variant Discrete Fourier Transform*) (Blough et al, 1996; Blough, 1998).

O método da TVDFT não necessita da reamostragem do sinal, ou seja, não há a necessidade de converter os dados de vibração no domínio do tempo para o domínio do ângulo. O método é aplicado diretamente nos dados de vibração que foram amostrados com intervalo de tempo constante, o que reduz consideravelmente o esforço e o tempo computacional (Blough, 1998).

A TVDFT é definida como uma transformada de Fourier discreta com um núcleo (*kernel*) cuja frequência varia com o tempo ou neste caso, com a rotação da máquina. Este núcleo é uma função seno ou cosseno de amplitude unitária com uma frequência instantânea ajustada à ordem que se deseja seguir, a cada instante de tempo. A TVDFT é baseada nas seguintes equações:

$$a_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n \cdot \Delta t) \cos \left(2\pi \int_0^{n \cdot \Delta t} (O_m \cdot \Delta t \cdot \frac{rpm}{60}) dt \right) \quad (3a)$$

$$b_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n \cdot \Delta t) \sin \left(2\pi \int_0^{n \cdot \Delta t} (O_m \cdot \Delta t \cdot \frac{rpm}{60}) dt \right) \quad (3b)$$

sendo que O_m ($m\Delta o$) é a ordem que está sendo analisada, x é vetor de dados de vibração, N é o tamanho do bloco da transformada, Δt é o intervalo de amostragem, a_m os coeficientes de Fourier do termo cosseínodal para O_m , b_m os coeficientes de Fourier do termo senoidal para O_m , e rpm a rotação instantânea da máquina.

De forma a se obter melhores resultados quando ordens são muito próximas uma das outras ou quando se cruzam, uma matriz de compensação de ortogonalidade (*orthogonality compensation matrix* - OCM) pode ser aplicada. A aplicação da OCM também permite que sinais com altas taxas de aceleração sejam analisados mais precisamente. A OCM deve ser aplicada em uma etapa posterior à estimativa da ordem através da TVDFT. Ordens muito próximas são geralmente difíceis de serem separadas usando os métodos de reamostragem digital e da TVDFT. Contudo, se a OCM for usada, a ordem sob análise pode ser seguida de forma mais precisa. (Blough, 1998).

A correção das ordens com a matriz OCM consiste na solução de um conjunto de equações lineares que são resolvidas para cada valor de rpm:

$$\begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & \cdots & e_{1m} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & & e_{2m} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & & e_{3m} \\ \vdots & & & & \vdots \\ e_{m1} & & \cdots & & e_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \\ \vdots \\ o_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{o}_1 \\ \tilde{o}_2 \\ \tilde{o}_3 \\ \vdots \\ \tilde{o}_m \end{bmatrix}. \quad (4)$$

sendo que e_{ij} é a contribuição de ortogonalidade cruzada da ordem i na estimativa da ordem j , o_i é o valor corrigido da ordem i , e \tilde{o}_i é o valor estimado da ordem i obtida usando a TVDFT.

Os termos de ortogonalidade cruzada, e_{ij} , são calculados aplicando o núcleo da ordem i ao núcleo da ordem j , como mostrado na Eq. (5):

$$e_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ \exp \left(2\pi \int_0^{n\Delta t} (O_i \cdot \Delta t \cdot \frac{Rpm}{60}) dt \right) \cdot (\text{janela}) \cdot \exp \left(2\pi \int_0^{n\Delta t} (O_j \cdot \Delta t \cdot \frac{Rpm}{60}) dt \right)^* \right\} \quad (5)$$

A Eq. (4) é solucionada multiplicando ambos lados pela inversa da OCM. As estimativas das ordens resultantes são linearmente independentes uma das outras e são dadas pela expressão:

$$\begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \\ \vdots \\ o_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & \cdots & e_{1m} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & & e_{2m} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & & e_{3m} \\ \vdots & & & & \vdots \\ e_{m1} & & \cdots & & e_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{o}_1 \\ \tilde{o}_2 \\ \tilde{o}_3 \\ \vdots \\ \tilde{o}_m \end{bmatrix}. \quad (6)$$

3. ORDER TRACKING APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE MODOS OPERACIONAIS MISTOS

A técnica de *order tracking* pode ser utilizada para a identificação da(s) frequência(s) de rotação em que ocorre(m) modo(s) misto(s) de um sistema rotativo operando em regime não-estacionário. O método consiste em aplicar a técnica de *order tracking* no sinal não-estacionário e complexo. Este sinal complexo não estacionário no domínio do tempo será estacionário no domínio do ângulo e a transformada de Fourier deste sinal o transforma para o domínio da ordem. Desta forma, obtém-se um mapa de ordem direcional, ou seja, um mapa de ordem contendo ordens negativas e positivas.

Nas ordens negativas estão presentes as componentes de movimento de precessão retrógrada e nas ordens positivas as componentes de movimento de precessão direta.

Para ilustrar este processo, seja um rotor De Laval, conforme mostra a Fig.(4a). Este rotor é submetido a uma rampa de partida com uma aceleração angular constante. Assume-se que a única excitação atuante neste rotor é a força de desbalanceamento. A resposta ao desbalanceamento nas direções y e z obtidas através da integração numérica do modelo é apresentada na Fig. (6). Compondo-se o sinal complexo não estacionário na forma $p(t) = y(t) + j z(t)$ e aplicando-se a técnica da TVDFT & OCM neste sinal, obtém-se o mapa de ordem direcional, ou seja, obtém-se o gráfico da amplitude e do ângulo de fase da componente de precessão direta (P_f) e de precessão retrógrada (P_b) como função do tempo ou da rotação. Estas componentes podem ser visualizadas como sendo dois vetores rotativos girando em sentidos opostos compondo a órbita da estação, conforme Fig (4b) e segundo a expressão (Dias Jr e Allemang, 2000; Dias Jr et al., 2002):

$$p(t) = P_f e^{j\Omega t} + P_b e^{-j\Omega t} \quad (7)$$

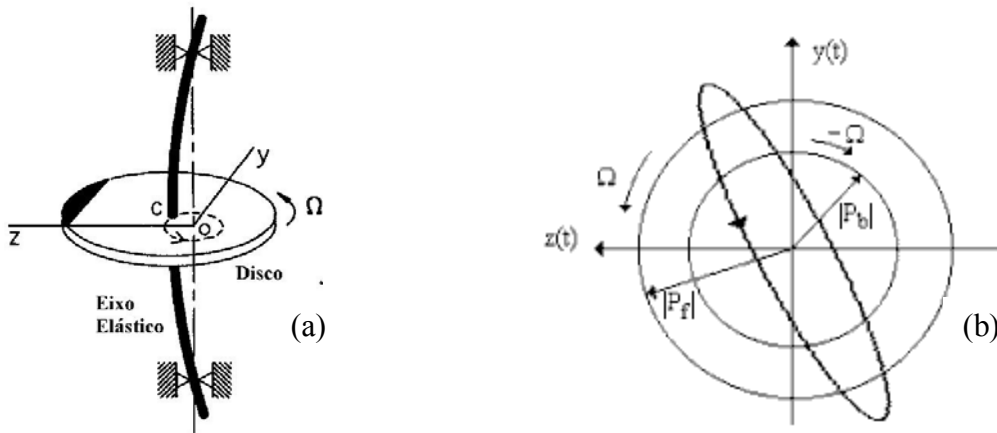


Figura 4. (a) Rotor De Laval; (b) Órbita (movimento de $p(t)$) de uma estação de um rotor anisotrópico descrita pela soma de dois vetores rotativos.

A TVDFT fornece a amplitude e ângulo de fase da ordem em termos de suas componentes de precessão direta (P_f) e de precessão retrógrada (P_b) como função do tempo ou da rotação. A amplitude foi obtida com a TVDFT e corrigida pelo OCM. Portanto, conhecendo-se $P_f(\Omega)$ e $P_b(\Omega)$, pode-se identificar as faixas de frequência de movimento de precessão direta e retrógrada, através da razão entre as duas grandezas. Han e Lee (1999) propuseram o índice SDI (*Shape and Directivity Index*) para identificar se o movimento precessional de uma específica estação do rotor será direta ou retrógrada, circular, elíptica ou retilínea. O SDI é dado por:

$$-1 \leq SDI = \frac{|P_f| - |P_b|}{|P_f| + |P_b|} \leq 1 \quad \begin{array}{ll} SDI = -1 & \Rightarrow \text{Mov. de precessão circular retrógrado} \\ -1 < SDI < 0 & \Rightarrow \text{Mov. de precessão elíptico retrógrado} \\ SDI = 0 & \Rightarrow \text{Movimento retilíneo} \\ 0 < SDI < 1 & \Rightarrow \text{Mov. de precessão elíptico direto} \\ SDI = 1 & \Rightarrow \text{Mov. de precessão circular direto} \end{array} \quad (8)$$

No gráfico da amplitude das ordens positiva e negativa (Fig.(8)), verifica-se que o movimento de precessão retrógrada do rotor só existe entre as duas frequências naturais, situação em que a componente de precessão retrógrada é maior que a direta; e conforme o gráfico de SDI (fig. (9)), a faixa de frequências correspondente a movimento de precessão retrógrada situa-se entre 1086,1 e 2573,5 rpm (valor do SDI menor que zero).

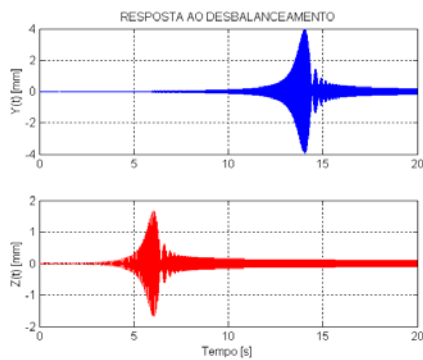


Figura 6. Respostas ao desbalanceamento.

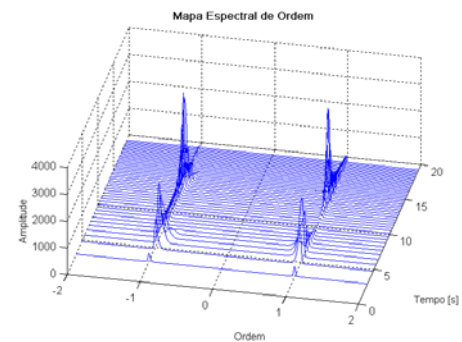


Figura 7. Mapa de ordem direcional.

A seguir, o método proposto, exemplificado nesta análise numérica, é aplicado nas respostas ao desbalanceamento de quatro estações do rotor da bancada apresentada mostrada na Fig. (10). A Fig. (11) ilustra o aparato instrumental usado nos ensaios.

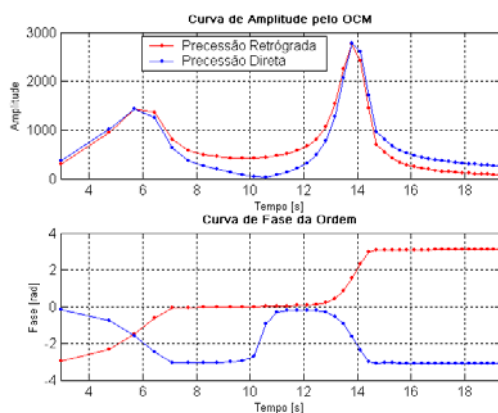


Figura 8. Amplitude e ângulo de fase da ordem em função do tempo.

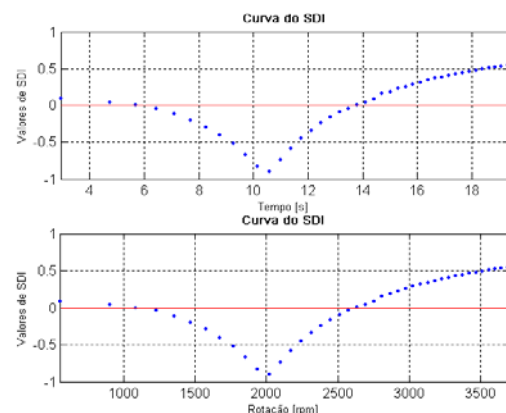


Figura 9. Gráfico do SDI em função do tempo e da rotação.

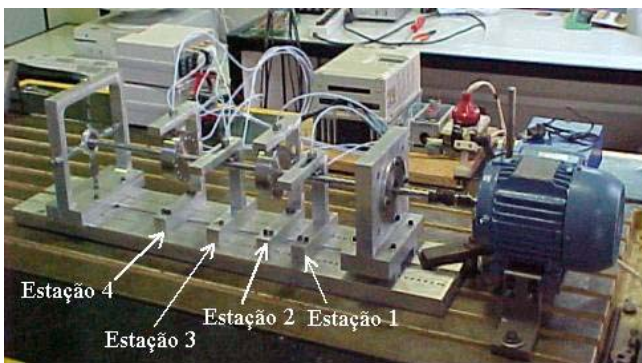


Figura 10. Rotor Bently usado nas análises de *order tracking* direcional.

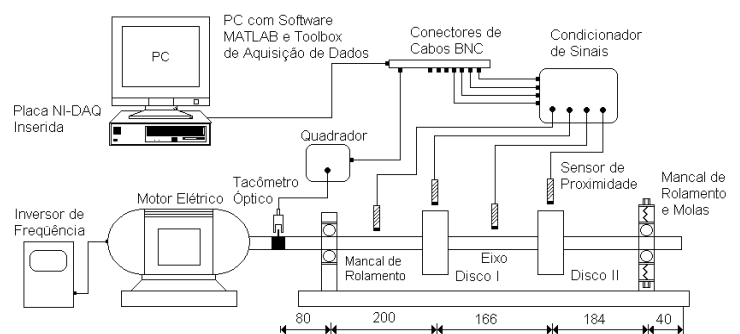


Figura 11. Esquema da instrumentação utilizada.

As respostas foram medidas nas quatro estações do rotor em direções perpendiculares, tendo sido usadas portando, oito sensores de proximidade. Na Fig.(11) estão mostrados apenas os sensores dispostos em uma direção. Os sinais de resposta passam pelo condicionador de sinal (oscilador/demodulador) e então enviados à placa de aquisição e disponíveis para serem tratados com o MATLAB. A velocidade de rotação é controlada pelo inversor de frequência e medida através do sinal do tacômetro óptico.

Na aquisição de dados foram medidos sinais de três faixas de rotação. Não foi usada somente uma faixa devido à limitação de amostras de dados pelo sistema de aquisição. As faixas medidas foram aproximadamente: faixa I: de 32 a 40 Hz, faixa II de 41 a 50 Hz, faixa III de 52 a 58 Hz.

Cada uma sendo medida durante 10 s. Em uma primeira análise, em todas as faixas, verificou-se que os movimentos de todas as estações eram de precessão direta, como exemplifica a Fig. (12), que mostra os resultados da estação 1 para a faixa III. Nesta figura estão apresentados o mapa de ordem direcional e o gráfico de P_f e P_b em função do tempo e também da rotação. Em uma segunda análise, efetuou-se um giro no disco II de 90° em relação ao disco I. Os resultados obtidos na faixa III para as estações 1, 2 e 4 mostram que elas se movem em precessão direta (este resultado não foi apresentado). Contudo, verifica-se que para a estação 3, há a mudança no sentido da precessão em 3270 rpm. Esta estação passa de movimento de precessão direto para retrógrado. A Fig. (13) mostra o mapa de ordem direcional e amplitudes das ordens para a estação 3. Nesta condição, portanto, na faixa de 3270 rpm (54,5 Hz) a 3518 rpm (58,6 Hz), o sistema possui modos operacionais mistos.

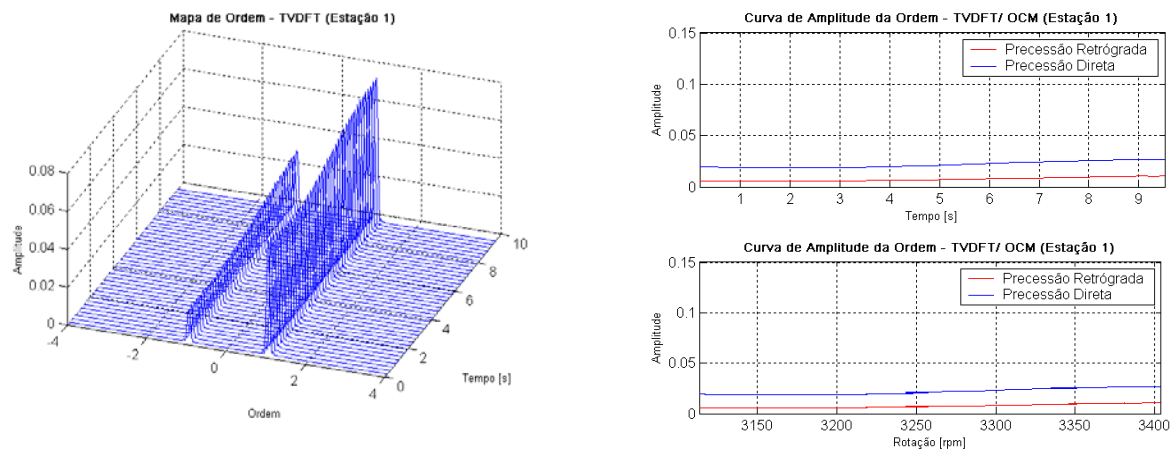


Figura 12. Mapa de ordem direcional e amplitude das componentes de precessão direta e retrógrada medidos na estação 1.

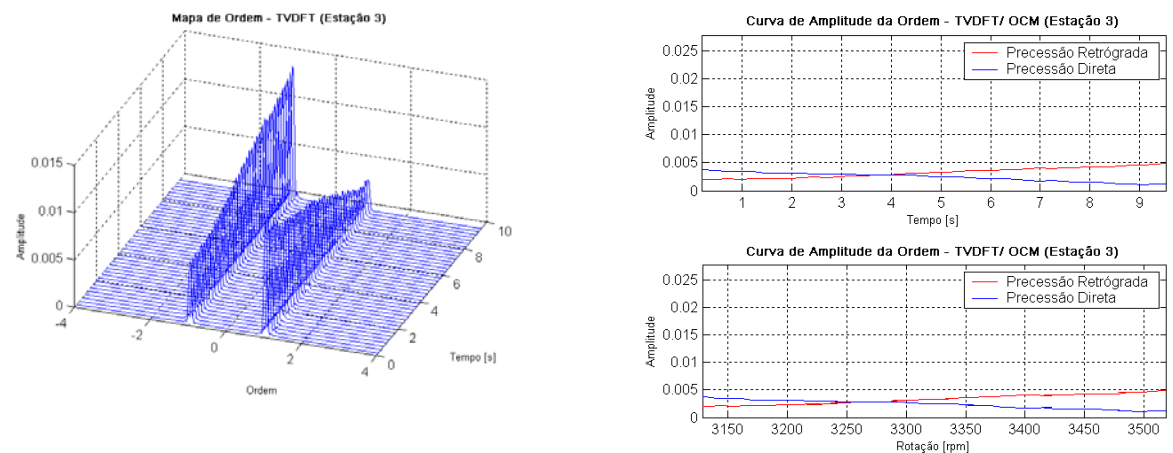


Figura 13. Resultados referentes à estação 3 durante uma variação de rotação de 52,13 Hz (3128 rpm) a 58,6 Hz (3518 rpm). Disco II girado de 90° .

Na terceira análise, efetuou-se mais um giro de 90° no disco II em relação ao disco I, ou seja, o disco II foi girado 180° em relação à sua posição inicial na primeira análise. De acordo com os gráficos das quatro estações, pôde-se observar que durante toda a faixa de 52,58 a 59,25 Hz, as duas primeiras estações precessionam no sentido retrógrado, enquanto que as estações 3 e 4 precessionam no sentido direto, caracterizando modos mistos nesta faixa de rotação. As Figuras (14) e (15) mostram os resultados para a primeira e terceira estação, respectivamente.

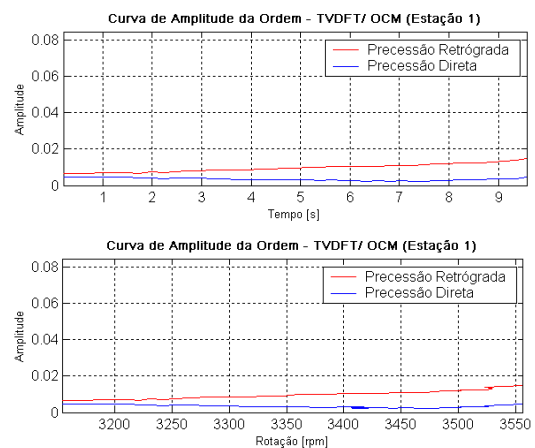
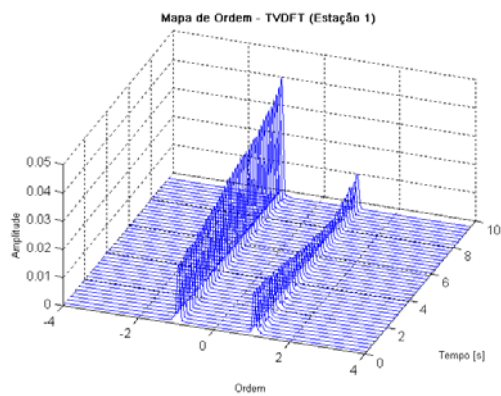


Figura 14. Gráficos referentes à estação 1 durante uma variação de rotação de 52,58 Hz (3155 rpm) a 59,25 Hz (3555 rpm). Disco II girado de 180° .

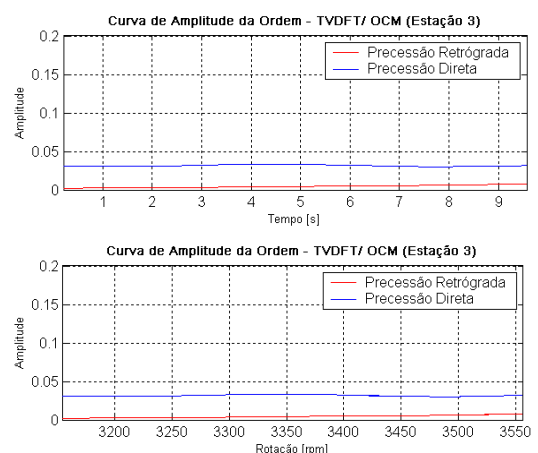
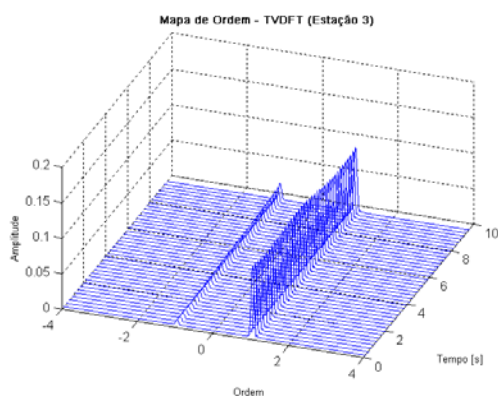


Figura 15. Gráficos referentes à estação 3 durante uma variação de rotação de 52,58 Hz (3155 rpm) a 59,25 Hz (3555 rpm). Disco II girado de 180° .

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma metodologia para se identificar as faixas de frequências correspondentes a ocorrência de modos operacionais mistos, durante uma variação da velocidade de rotação do sistema. O método baseia-se na análise do mapa de ordem direcional, obtido através da aplicação da técnica de *order tracking* no sinal de vibração complexo do sistema rotativo.

A metodologia da técnica é descrita através de uma simulação numérica da partida de um rotor De Laval. Em seguida o método é aplicado em um sistema real. Neste caso, foram identificadas algumas faixas de frequências em que ocorrem modos mistos. Verificou-se a influência da distribuição do desbalanceamento no surgimento destes modos. Esta constatação foi feita analisando os resultados após sucessivos giros nos discos desbalanceados do rotor. Quanto a desvantagens, pode-se citar o uso da alta taxa de amostragem para que o sinal do tacômetro seja bem estimado, e conseqüentemente, para que a curva de rotação instantânea seja bem precisa. Devido a esta alta taxa de amostragem, os dados de vibração possuem um número de amostras bastante grande, acarretando em um maior esforço computacional para realizar a análise.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Blough, J. R., Brown, D. L., Vold, H., "Order Tracking With Time Variant Discrete Fourier Transform", Proceedings of the 21st International Seminar of Modal Analysis - Noise and Vibration Engineering, p. 1515-1525, Leuven, Belgium, 1996.
- Blough, J. R., 1998, Improving The Analysis Of Operating Data On Rotating Automotive Components, Department of Mechanical, Industrial, and Nuclear Engineering of the College of Engineering, University of Cincinnati, Cincinnati.
- Dias Jr., M., Allemang, R.J., 2000, "Some Insights into the Simultaneous Forward and Backward Whirling of Rotors", Proceedings of the 20th IMAC.
- Dias Jr., M., Idehara, S.J., Mesquita, A.L.A., Miranda, U.A., 2002, "On the Simultaneous Forward and Backward Whirling of Flexible Rotors: Numerical Analysis and Experimental Verification", IFToMM, 6th International Conference on Rotor Dynamics, Sydney, Australia, pp. 496-503.
- Miranda, U.A., Dias Jr., Mesquita, A.L.A., Idehara, S.J., 2002, "On the Application of Directional Time-Frequency Distribution to the Identification of Simultaneous Forward and Backward Whirling in Flexible Rotors", IFToMM, 6th International Conference on Rotor Dynamics, Sydney, Australia, pp. 504-51.
- Vold, H., Leuridan, J., "High Resolution Order Tracking At Extreme Slew Rates, Using Kalman Tracking Filters", Proceedings of the Noise and Vibration Conference, SAE Technical Paper 931288, Tranverse City, MI, USA, 1993.
- Vold, H., Mains, M., Blough, J. R., "Theoretical Foundations For High Performance Order Tracking With The Vold-Kalman Filter". Proceedings of the Noise and Vibration Conference, SAE Technical Paper 972007, Traverse City, MI, USA, 1997.

Direitos Autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Mixed Operational Modes Identification in Rotative Machines Using Directional Order Map

Alexandre Luiz Amarante Mesquita

Federal University of Pará, Mechanical Engineering Department, alexmesq@ufpa.br

Sérgio Junichi Idehara

University of Campinas, Mechanical Engineering Faculty, UNICAMP
junichi@fem.unicamp.br

Milton Dias Jr.

University of Campinas, Mechanical Engineering Faculty, UNICAMP
milton@fem.unicamp.br

Abstract: *In this paper, the TVDFT Order Tracking technique (Time Variant Discrete Fourier Transform) is used to processing complex non-stationary signals, generated by real measured signals. The method is applied in an experimental set-up for several run-ups, in order to identify the forward and backward precession movement in the directional order map. In this map, the negative orders are related to the backward and the positive ones to the forward orbit movement. The directional order maps are obtained for several rotor stations in order to identify the mixed operational modes, i.e., when some stations of the rotor describe their precessional movement in the forward direction while others move in the backward direction simultaneously.*

Key words: vibration, rotordynamic, operational modes, order analysis.