



21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS NÃO CONVENCIONAIS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO, PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM MAQUINAS ROTATIVAS HORIZONTAIS

Marcelo dos Reis Farias, marcelo-soul@hotmail.com¹
Paulo Roberto Farias Junior, paulofarias@id.uff.br^{1,2}
Renato de Oliveira Rocha, rr.uerj@gmail.com¹
Francisco José da Cunha Pires Soeiro, soeiro@uerj.br¹

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua Fonseca Teles 121 – Anexo - São Cristovão. CEP: 20940-200,

²CEFET/RJ – Campus Nova Iguaçu, Estrada de Adrianópolis - 1.317 - Santa Rita – Nova Iguaçu/RJ. CEP: 26041-271,

Resumo: Em termos populares, tem sido dito que: “as máquinas falam e através dos seus sons e vibração podemos ouvir suas queixas e diagnosticar suas doenças”. O monitoramento da condição de máquinas rotativas através da medição e análise de vibração é o processo no qual uma máquina é avaliada periodicamente através da medição e análise de vibração e suas condições são verificadas através dos sinais de vibração. Este monitoramento pode ser realizado em três níveis: 1- Medição global dos níveis de vibração, para conhecer a severidade da vibração e comparar com limites pré-estabelecidos; 2- Análise do espectro de frequência, para detectar de onde vem a vibração e possíveis defeitos; 3- Técnicas especiais, que podem detalhar melhor o nível, local e tipo do defeito ou mal funcionamento. Este trabalho tem o objetivo de avaliar algumas dessas técnicas especiais como: Full Spectrum, SPM spectrum, Orbita, Análise de fase / ODS e Envelope. Estas técnicas foram aplicadas numa bancada experimental que permite introduzir diversos defeitos nos mecanismos presentes como: desalinhamento, desbalanceamento, defeitos em engrenagens, problemas em rolamentos, etc. Os resultados obtidos através de cada técnica foram avaliados e comparados. A análise final dos resultados é expressa utilizando o método da lógica digital para criação de tabelas comparativas das técnicas para cada tipo de defeito, sendo possível identificar qual técnica é melhor para diagnosticar um tipo específico de defeito.

Palavras-chave: análise de vibração, detecção de defeitos, técnicas não convencionais, máquinas rotativas, lógica digital.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo a área de manutenção tem evoluído significativamente. Com o avanço da tecnologia das máquinas e dos sistemas de produção, tem sido cada vez mais necessário a implantação de sistemas de manutenção mais eficazes, com o objetivo de prevenir ao máximo a quebra de máquinas e equipamentos, tendo em vista o alto custo de reparo e o prejuízo de parar um processo de produção para fazer reparos de urgência. Assim, os sistemas de manutenção preditiva vêm ganhando força no mercado de manutenção e tem sido cada vez mais aceitos e inseridos nas indústrias e plantas de produção. Os objetivos da manutenção preditiva são: determinar antecipadamente a necessidade de serviços de manutenção específica de uma máquina para manter a boa condição operacional; eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção e reposição de peças; aumentar o tempo de disponibilidade dos equipamentos; reduzir o trabalho de emergência não planejado; impedir o aumento dos danos ou mau funcionamento; aproveitar a vida útil total dos componentes e de um equipamento; aumentar o grau de confiança no desempenho de um equipamento ou linha de produção; diagnosticar a condição operacional da máquina.

Dentre as técnicas de monitoramento das máquinas estão: termografia, análise de vibração, análise de ruído, análise de óleo, análise estrutural, etc. Através da análise da vibração de máquinas é possível verificar a existência de defeitos ou mau funcionamento tais como: desalinhamento, desbalanceamento, desgaste, problemas de ressonância, condição dos rolamentos, engrenagens com dentes quebrados, má lubrificação e até mesmo alguns problemas elétricos.

Neste contexto que em 2013 foi desenvolvida, projetada e construída uma bancada experimental no projeto de graduação de (Farias, 2014) com o tema de “Construção de bancada experimental para análise dinâmica de máquinas

rotativas”. Este projeto inicial foi focado apenas na parte de construção da bancada experimental, com detalhamento dos processos de fabricação, especificação de peças e materiais, cálculos de folgas etc. Em 2015 a bancada foi aprimorada para atender necessidades de dois projetos de mestrado e atualmente esta sendo utilizada para o desenvolvimento e estudo de técnicas de análise de vibrações para detecção de defeitos em máquinas rotativas e análise de fenômenos de dinâmica de rotores.

A bancada é constituída basicamente por um motor elétrico trifásico que é acionado e controlado através de um inversor de frequência. Acoplado diretamente ao motor elétrico existe um sistema de eixo (flexível), mancais e discos de balanceamento e paralelamente também um sistema de dois eixos rígidos com engrenagens redutoras e acionamento através polias e correia. Tudo isso sobre uma chapa de aço comum apoiado sobre molas numa base estrutural também em aço. Este sistema possibilita diversas configurações de montagem bem como a introdução de defeitos como: desalinhamento, desbalanceamento, defeitos em engrenagens (folgas, desalinhamento, dentes quebrados), problemas em rolamentos, etc. As medições de vibração são captadas através de instrumentação da National Instruments e software LabView e os dados são processados no software MatLab.

Este trabalho tem o objetivo de avaliar as seguintes técnicas não convencionais de análise de vibração: Full Spectrum, SPM, Orbita, Análise de fase / ODS e Envelope. Foram realizados ensaios na banca experimental separadamente para cada tipo de defeito. As técnicas selecionadas foram aplicadas em todos os ensaios e os resultados obtidos foram comparados entre as condições “saúáveis” e “com defeito”, e também com os padrões de vibração e sintomas esperados para cada tipo de defeito.

A análise final dos resultados é expressa utilizando o método da lógica digital para criação de tabelas e gráficos comparativos das técnicas para cada tipo de defeito, sendo possível identificar qual técnica é melhor aplicada para diagnosticar um tipo específico de defeito.

Desta forma, inicialmente será apresentada uma descrição de cada técnica e o método de avaliação utilizado. Em seguida resultados experimentais serão apresentados.

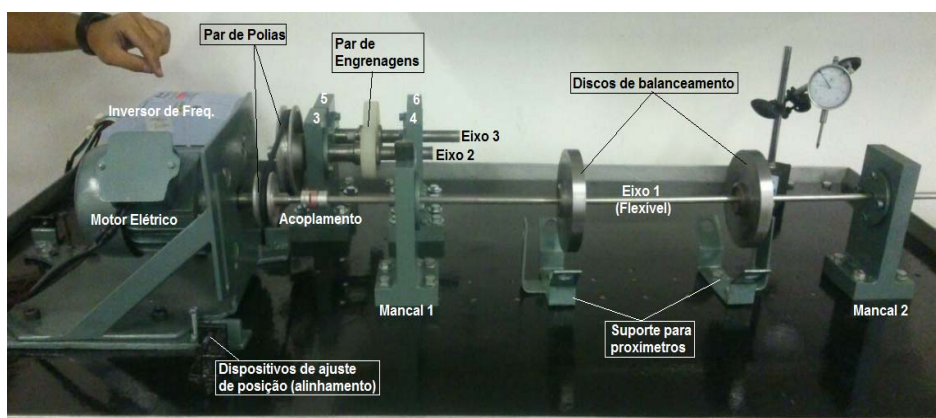


Figura 1. Bancada Experimental

2. DESCRIÇÃO DAS TÉCNICAS

Para distinguir a diferença entre as técnicas convencionais e não convencionais consideremos três diferentes níveis de monitoramento e análise de vibrações:

1º- Medição global dos níveis de vibração - É a medida da severidade de vibração que é geralmente utilizada para avaliação preliminar da condição da máquina. Este tipo de medição é expresso geralmente através do valor RMS de vibração que é a média quadrática dos picos de vibração em um determinado range de frequência (geralmente de 1 a 1000Hz). Esse tipo de medição resultará em apenas um valor, e então comparando medições realizadas anteriormente ou com valores de referência (normas como ISO 10816, ISO 2372 ou até mesmo padrões do fabricante de cada máquina), para um determinado tipo de máquina, é possível fazer uma avaliação inicial para saber se existe ou não uma anormalidade nos níveis de vibração e possivelmente já relacionar com defeitos.

2º- Análise espectral ou análise de frequência. – É a análise do gráfico de Amplitude de vibração X Frequência, que é gerado aplicando-se a transformada rápida de Fourier (FFT) no sinal de vibração no domínio do tempo. Este gráfico é chamado de espectro de frequência e possibilita identificar a amplitude de cada frequência de vibração e assim é possível identificar quais são as frequências mais relevantes para uma determinada medição e relacionar as frequências observadas em destaque com as fontes que geram aquelas frequências e assim detectar se existe e onde é o defeito na máquina;

3º- Técnicas especiais de análise de vibração que através da aplicação filtros, apresentações gráficas e diferentes processamentos dos sinais, podem detalhar melhor o nível, local e tipo de defeito ou mal funcionamento em uma máquina.

Assim, o 1º e 2º nível de monitoramento e análise de vibrações apresentados, podem ser considerados como técnicas convencionais, pois são as mais usadas e até mesmo mencionadas em normas técnicas, manuais de fabricantes de máquinas, órgãos regulamentadores e até mesmo seguradoras. Logo as técnicas não convencionais de análise de vibração são aquelas que fazem parte do que chamamos de terceiro nível de monitoramento e análise de vibrações.

As técnicas não convencionais que serão abordadas neste trabalho são: Órbita, Full spectrum, SPM, Envelope, ODS e Análise de fase.

2.1. Órbita

A órbita (Bently, 2002) representa a trajetória do centro do eixo no plano de leitura do par de sensores de proximidade.

A construção da órbita consiste na combinação dos dados presentes nas formas de onda do par de sensores de proximidade, defasados 90°, para criar um gráfico que exibe o movimento do centro do eixo relativamente à estrutura da máquina, em duas dimensões. Os sensores são montados rigidamente na estrutura das máquinas, junto às zonas de apoio do eixo (mancais). Devido à fácil interpretação e quantidade de informação que o gráfico contém, a órbita, conciliada com o sensor de velocidade rotação (Keyphasor®) é um gráfico eficaz para o diagnóstico de avarias em máquinas rotativas.

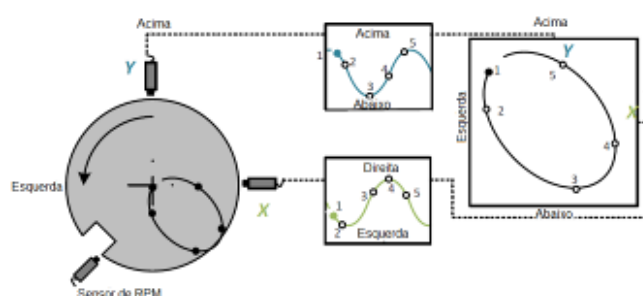


Figura 2. Órbita resultante do par de sensores XY (Adaptado de Bently, 2002).

A órbita, especialmente se dotada de keyphasor, pode ser utilizada para medir a amplitude pico-a-pico em qualquer direção radial, a frequência relativa da vibração ou o sentido de precessão. O perfil da órbita pode fornecer pistas importantes sobre o comportamento das máquinas, realçar alterações na resposta que seriam imperceptíveis nas técnicas convencionais, e ajudar a identificar a localização do problema na máquina (Bently, 2002). A órbita filtrada para uma determinada frequência pode ser utilizada para estimar a fase absoluta das duas componentes do sinal (Bently, 2002). A fase relativa (Eisenmann & Eisenmann Jr., 2005) de dois sinais também pode ser estimada.

2.2. Full spectrum

O espectro de frequências resulta da aplicação da transformada FFT ao sinal no tempo. Já o full spectrum (Southwick, 1993) trata-se do espectro de uma órbita. Deriva das formas de onda provenientes do par de sensores de proximidade, combinado com o conhecimento do sentido de rotação. Os dois sensores fornecem informação sobre a fase o que permite ao algoritmo full spectrum determinar o sentido de precessão a cada frequência (Felicio 2015).

O full spectrum é calculado através da aplicação do algoritmo FFT à forma de onda de cada sensor. Em seguida, os resultados são sujeitos a outra transformada (Goldman & Muszynska, 1999) que converte os dados em dois novos espectros que representam frequências de precessão, um espectro de precessão X para Y e um de precessão Y para X. Por último, o sentido de rotação é utilizado para determinar qual dos espectros representa frequências de precessão direta (forward) e qual representa frequências de precessão reversa (reverse). Quando este processo é concluído, combinam-se os dois espectros num único gráfico, o full spectrum (Figura 3):

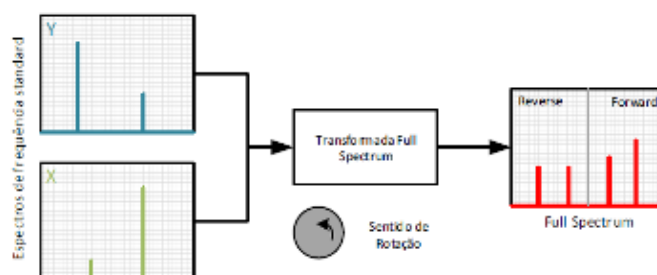


Figura 3. Processo que resulta no full spectrum (Adaptado de: (Felicio 2015)).

2.3. SPM - Shock Pulse method

Método Shock pulse é uma técnica de processamento de sinal utilizada para medir impacto entre metais e ruído de rolamento, tais como os encontrados em mancais de rolamento e engrenagens. Diferente da medição de vibração comum, a medição de shock pulse não mede o movimento mas o impacto que é propagado pelo metal através de frequências de ultra-som. A medição de shock pulse resulta em dois resultados: valores máximos chamados de “dBm e valores mínimos (carpete) chamados de “dBc”. Os valores de dBm são classificados conforme o RPM da máquina e o diâmetro do rolamento. Através destes valores e também da avaliação do espectro desta medição é possível diagnosticar a condição de rolamentos e identificar defeitos em rolamentos, lubrificação, engrenagens, compressores etc.

Quando dois pedaços de metal, em movimento, entra em contato com o outro, dois processos inter-relacionados ocorrem. Com o impacto inicial uma onda de choque ou pressão se desenvolve e rapidamente se propaga através do metal. Este pulso de choque está no range de frequências de ultra-som e normalmente ocorre em torno de uma frequência central de 36 kilohertz. A amplitude do pulso de choque é relativo à velocidade do impacto. Como o sinal se expande a partir do seu ponto de origem, é dissipada pelo carbono e outras imperfeições no metal. Esta onda de choque ou pressão é o que somos interessados em medir utilizando o Método de shock pulse.

Para medir shock pulse se usa uma filtragem combinada com um sensor especial (acelerômetro) que tem ressonância em 36KHz. O processamento da medição de shock pulse passa por 3 etapas: 1 – Amplificação do sinal – Os sinais de choque de pulso são relativamente pequenos em amplitude e não viajam grandes distâncias. Por isso precisam ser amplificados. 2- Filtragem - Para distinguir a vibração de pulsos de choque um filtro de passagem de banda em torno do 36 KHz é usado. Isso ajuda a isolar o pulso de choque de outras interferências criadas por vibrações das máquinas. 3 – Conversão para pulsos - O último estágio deste processamento de sinais é a conversão de uma forma de onda para pulsos analógicos. Este processo fornece um sinal que pode então ser processado para determinar a condição do rolamento (Greg Lee, 2015).

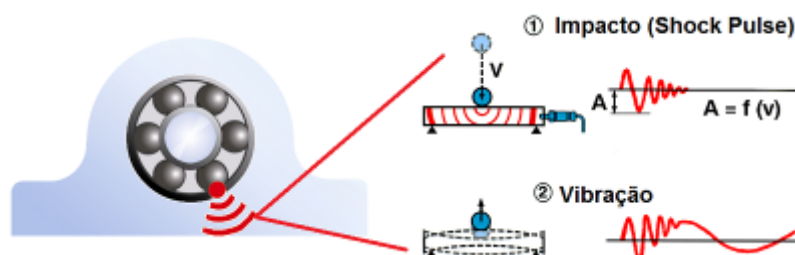


Figura 4. Diferença entre shock pulse e vibração (adaptado de: SPM instrument).

2.4. Envelope

A técnica Envelope, também referida como "demodulação de amplitude", é a técnica de extrair o sinal de modulação a partir de um sinal de amplitude modulada. O resultado é a evolução temporal do sinal modulado. Este sinal pode ser estudado / interpretado através da vibração no domínio do tempo ou pode ser submetido a uma análise de frequência. Análise envelope é a FFT (Fast Fourier Transform – Transformada rápida de Fourier) espectro de frequência o sinal modulado. A técnica envelope pode ser utilizada para diagnóstico e investigação de defeitos em máquinas onde falhas têm um efeito de modulação de amplitudes. Exemplos incluem falhas em engrenagens, turbinas e motores de indução. Análise do envelope é também uma excelente ferramenta para o diagnóstico de falhas em rolamentos (Hans, 2003).

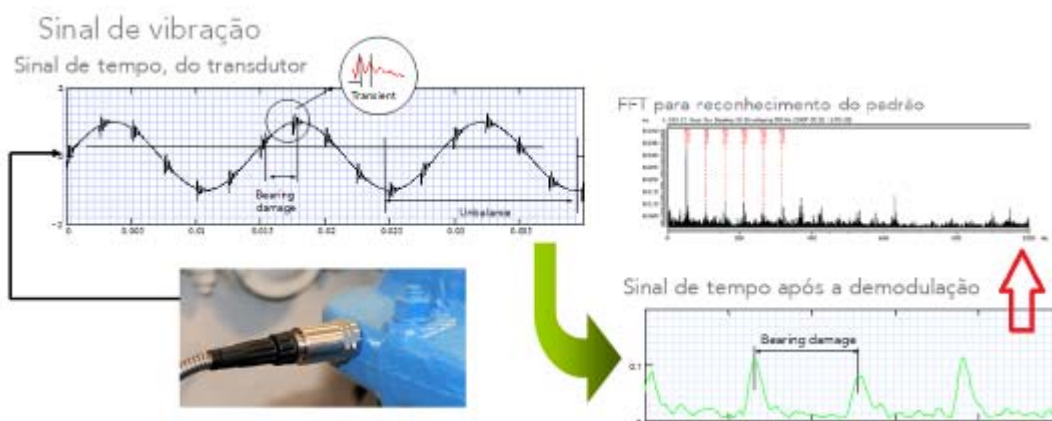


Figura 5. Processo de obtenção do Envelope (adaptado de: SPM instrument).

2.5. ODS

Tradicionalmente, ODS tem sido definido como a deflexão de uma estrutura em uma frequência particular. No entanto, um ODS pode ser definido de uma forma mais geral como qualquer movimento forçado de dois ou mais pontos em uma estrutura (Brian, 1999). Especificando o movimento de dois ou mais pontos define-se uma forma. Dito de outra forma é o movimento de um ponto em relação a todos os outros. O movimento é um vetor quantidade, o que significa que tem de localização e direção associada com isso. Isso também é chamado de grau de liberdade.

Realizar medição de ODS pode ajudar a responder as seguintes questões relacionadas a vibração:

- Quanto a máquina está vibrando?
- Onde ocorre a maior vibração e em qual sentido?
- Qual é a relação do movimento de um ponto em relação a outro (está em modo de deflexão de operação)?
- É um caso de ressonância? Com que se parece o modo de vibração do sistema?
- Existe ruído proveniente da estrutura?
- Existem ações corretivas que podem reduzir os níveis de ruído ou vibração?

ODS pode ser simulado através de programas de elementos finitos para conhecimento da forma de deflexão do sistema ou medido através do mapeamento da superfície com sensores de vibração sendo acionados simultaneamente.

2.6. Análise de fase

A análise de fase é uma ferramenta que auxilia na detecção de defeitos e interpretação do movimento da máquina / estrutura. Determinados tipos de defeitos geram diferenças de fase conhecidas entre dois ou mais pontos de medição, ajudando a distinguir o tipo defeito específico e a ação que deve ser tomada para a correção. A análise de fase pode ser considerada como complemento ou parte da técnica ODS.

3. METODO DE AVALIAÇÃO

A abordagem da lógica digital é geralmente utilizada no processo de seleção de materiais para fabricação e neste trabalho será usada como uma ferramenta sistemática para avaliação das técnicas de análise de vibrações.

Se muitas técnicas são especificadas e a importância relativa de cada uma não for clara, determinações intuitivas de coeficiente relativo de ênfase (α) podem predominar, o que reduz a confiabilidade da seleção de qual técnica será utilizada, tendo em vista os tipos de defeitos possíveis e mais comuns para aquele determinado sistema.

Neste procedimento, as avaliações são dispostas de tal maneira que só duas técnicas são consideradas de cada vez. Para determinar a importância relativa de cada técnica, é construída uma tabela. As técnicas são listadas na coluna do lado esquerdo e as comparações são feitas em colunas à direita, como mostrado na Tabela 01 a seguir. Na comparação de duas técnicas, a mais importante é dado o número "1" e a menos importante é dado "0". O total de decisões possíveis é $N = n(n-1)/2$ onde n é o número de técnicas em consideração.

Um coeficiente relativo de ênfase, ou fator de ponderação, α , para cada técnica, é obtido pela divisão do número de decisões positivas para cada técnica, pelo número total de decisões possíveis (N). Nesse caso, o $\sum \alpha = 1$.

Tabela 01. Capacidade de diagnosticar defeitos de cada técnica de análise de vibrações.

DEFEITO X	Decisões positivas possíveis (N) (*)						Decisões positivas	Coeficiente relativo de ênfase (α) (**)
	1	2	3	4	5	6		
Técnica 1	1	1	1				3	0,50
Técnica 2	0			1	0		1	0,17
Técnica 3		0		0		1	1	0,17
Técnica 4			0		1	0	1	0,16
Total de decisões positivas							6	$\sum \alpha = 1$

(*) $N = n(n-1)/2$, sendo neste caso $n = 4$ (**) Aqui, exemplos hipotéticos.

Através das tabelas geradas para cada tipo de defeito é possível identificar qual técnica é melhor aplicada para diagnosticar um tipo específico de defeito e também é possível selecionar conjuntos de técnicas mais indicadas para determinadas aplicações onde já se prevê a possibilidade de um conjunto específico de defeitos.

4. ENSAIOS REALIZADOS E RESULTADOS

Neste trabalho foram realizados ensaios de aplicação dos defeitos de ressonância, desbalanceamento e defeitos em rolamentos, através da bancada experimental. Estes ensaios foram realizados ajustando a bancada para condições adequadas de funcionamento (sem defeitos) e em seguida aplicou-se o defeito em questão. As medições de vibração foram tomadas nas duas condições e comparadas conforme a metodologia de avaliação que foi apresentada.

4.1. Frequências naturais, Modos de vibração, velocidade crítica e ressonância.

Para determinação das frequências naturais, modos de vibração, velocidades críticas e ressonância, os ensaios foram divididos em duas abordagens diferentes: a primeira considerando todo o conjunto como corpo rígido e a segunda considerando apenas o sistema de rotor (discos, eixo flexível e mancais 1 e 2).

Na abordagem de corpo rígido utilizamos 3 métodos para determinar a frequência natural do sistema para cada modo de vibração de translação e rotação nos eixos X, Y e Z. O primeiro deles foi o de simulação computacional por elementos finitos através do software Solidworks. O segundo método foi de varredura de frequência, onde através do inversor de frequência fomos aumentando o RPM do motor gradualmente e observando em qual frequência os modos de vibração se destacaram através da amplitude de vibração. O terceiro e último método foi através da aplicação de um deslocamento inicial na direção de cada modo que se desejava excitar, forçando o aparecimento de cada modo de vibração e medindo a resposta de vibração. Os resultados destes testes foram bem satisfatórios conforme tabela 02.

Tabela 02. Frequências dos ensaios e simulações

Frequências	Simulação computacional (rpm)	Experimental-Varredura (Rpm)	Deslocamento inicial na direção do modo (Rpm)	Modos
1	112,6	Não identificado	330	Translação em Y
2	333,50	310,20	300	Translação em X
3	367,30	387,00	375	Translação em Z
4	440,54	452,00	450	Rotação em Z
5	489,64	505,00	495	Rotação em X
6	699,24	678,00	675	Rotação em Y

Na segunda abordagem (sistema de rotor) utilizamos o Software Rotmef que é um programa que foi desenvolvido especificamente para dinâmica de rotores (simulação computacional) e os resultados do software para diversas configurações de posições de discos e mancais foram confrontados com experimentos que comprovaram os valores de frequências naturais obtidos, conforme exemplo da configuração 1 que é referente ao disco posicionado no centro do vão de 590mm entre mancais, Tabela 03.

Tabela 03. Frequência de cada Modo de acordo com as rotações. Configuração 1 – Vel. Crítica de 950 RPM.

Rotações (rpm)	Frequência(Hz) dos Modos					
	1	2	3	4	5	6
550	15,4	15,41	84,78	88,72	161,77	162,1
1300	15,39	15,41	82,03	91,34	161,55	162,31
2000	15,38	15,42	79,45	93,7	161,33	162,5

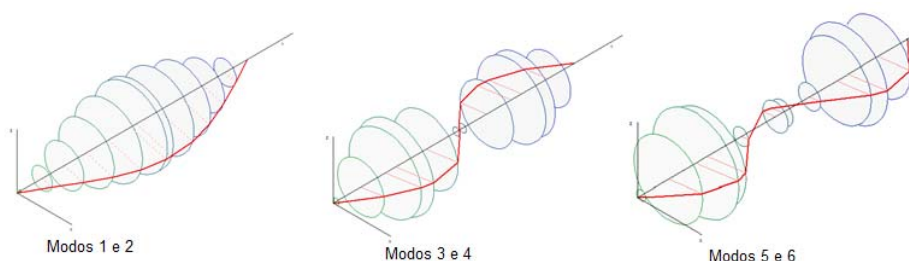


Figura 06. Modos de vibração para a configuração de um disco centralizado.

Na figura 06 pode ser observado que para cada formado de deformação do rotor existem dois modos de vibração associados. São eles o direto (sentido de precessão do eixo no mesmo sentido da rotação) e retrógrado (precessão do eixo em sentido oposto ao de rotação). A diferença entre os modos diretos e retrógrados podem ser observadas através da órbita filtrada para a frequência daquele modo e pelo espectro completo (full spectrum) conforme figura 07.

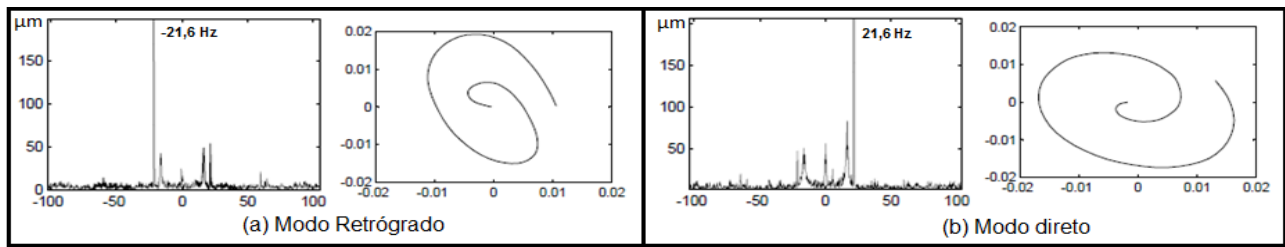


Figura 07. Full spectrum e Orbita para os primeiros modos direto e retrógrado na configuração 1 a 1300rpm.

Portanto através dos resultados obtidos nestes ensaios é possível observar que algumas técnicas não convencionais de análise de vibração que foram aplicadas, apresentaram boas respostas na identificação de casos de ressonância. Separando os dois casos de ressonância e as técnicas recomendadas para detecção, temos que:

Ressonância Estrutural / corpo rígido: Análise de fase / ODS.

Ressonância de sistemas rotativos (rotor): Full spectrum (espectro completo), Orbita, ODS / Análise de fase.

4.2. Desbalanceamento

Os ensaios de desbalanceamento foram subdivididos em seis etapas, sendo duas condições (balanceado e desbalanceado) para cada uma das três configurações: Estático, dinâmico e em balanço, conforme figura 08.

Nomenclatura dos ensaios de desbalanceamento: B1 – Estático (balanceado), B2 – Estático (desbalanceado), B3 – Dinâmico (balanceado), B4 – Dinâmico (desbalanceado), B5 – Balanço (balanceado), B6 – Balanço (desbalanceado).

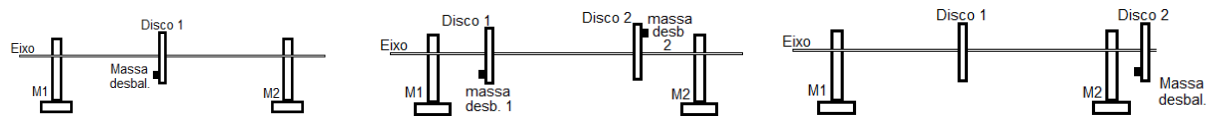


Figura 08. Configurações de mancais discos e eixos para ensaios de desbalanceamento.

Ensaio de desbalanceamento estático (B1 e B2):

Para o ensaio de desbalanceamento estático foi utilizada a configuração da figura 09, com apenas um disco centralizado no eixo 1 entre mancais M1 e M2 espaçados em 590mm.

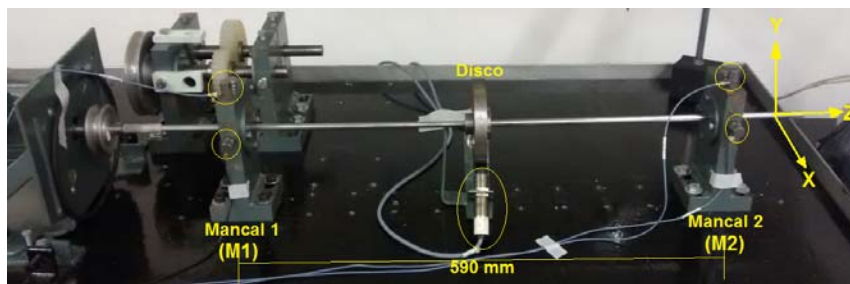


Figura 09. Configuração para ensaio de desbalanceamento estático (B1 e B2).

As tabelas e gráficos a seguir mostram os resultados das medições de vibração aplicando as técnicas convencionais, SPM, Envelope, análise de fase, Full spectrum e órbita.

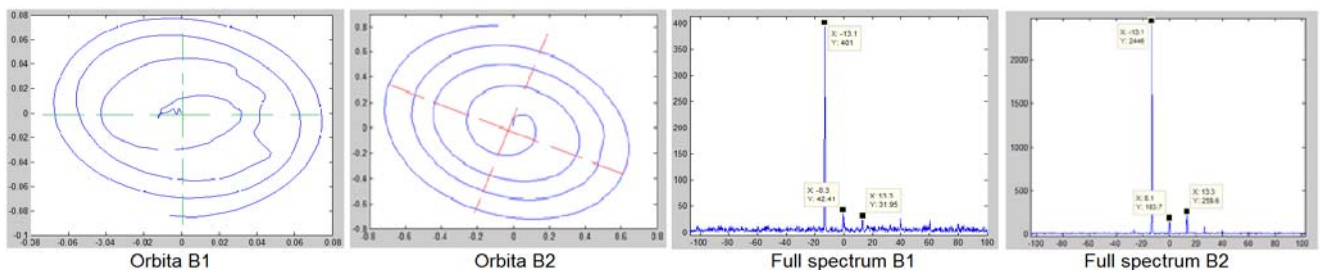


Figura 10. Orbitas e Full spectrum para os ensaios B1 e B2.

Tabela 04. Medições de vibração (acelerômetros) – desbalanceamento estático.

Medições de vibração dos acelerômetros - Desbalanceamento Estático									
ENSAIO	RPM	PONTO	DIREÇÃO	Disp, Rms	Vel, Rms (mm/s)	Acc, Rms (g)	1X RPM (mm/s)	Diferença de fase (°)	Aprox. de fase (°)
B1	800	M1	X1	6,67	0,5	0,08	0,02	175	180
			Y1	30,54	0,75	0,06	0,04		
		M2	X2	11,4	0,53	0,07	0,07	56	90
			Y2	8,11	0,49	0,06	0,08		
		M1e M2 X	X1	8,95	0,49	0,07	0,02	174	180
			X2	10,05	0,56	0,08	0,07		
B2	800	M1 B2	X1	29,13	2,37	0,08	2,34	120	90
			Y1	22,14	1,66	0,07	1,6		
		M2 B2	X2	55,26	4,56	0,1	4,51	108	90
			Y2	52,16	4,19	0,07	4,14		
		M1e M2 X B2	X1	33,5	2,68	0,1	2,6	14	0
			X2	50,48	4,1	0,1	4,06		
		M1e M2 Y B2	Y1	20,25	1,57	0,09	1,47	7	0
			Y2	52,72	4,28	0,07	4,22		

Tabela 05. Resultados Técnicas Envelope e SPM (B1 e B2)

ENSAIO	PONTO	DIREÇÃO	VIBRAÇÃO Envelope		SPM	
			Acc, Rms	1X RPM	dBm	dBc
B1	M1	ENV 1 X	0,4947	0,0017	11	-9
		ENV 2 X	0,0457	0,002		
		ENV 1 Y	0,585	0,0013		
		ENV 2 Y	0,0456	0,0014		
	M2	ENV 1 X	0,3112	0,0039	-3	-9
		ENV 2 X	0,0435	0,0025		
		ENV 1 Y	0,3055	0,0017		
		ENV 2 Y	0,0441	0,0015		
B2	M1	ENV 1 X	0,402	0,0018	10	-9
		ENV 2 X	0,0451	0,0027		
		ENV 1 Y	0,4601	0,0015		
		ENV 2 Y	0,0458	0,0013		
	M2	ENV 1 X	0,3544	0,0018	5	-9
		ENV 2 X	0,0449	0,0022		
		ENV 1 Y	0,2656	0,0014		
		ENV 2 Y	0,0445	0,0018		

Análise preliminar de resultados (desbalanceamento estático):

Os resultados obtidos nos ensaios B1 e B2 referentes ao desbalanceamento estático foram totalmente satisfatórios, apresentando as seguintes características: aumento de amplitude de vibração de B1 para B2 (média de 50X maior); pico dominante no espectro na frequência de 1 X RPM; medições nos mancais M1 e M2 estão em fase no ensaio B2; a órbita de B1 apresenta forma de contorno circular (conforme esperado); a órbita de B2 apresenta forma elíptica (conforme esperado para a condição de desbalanceamento); o Full spectrum mostra a predominância do modo retrogrado de vibração, devido ao pico predominante no lado esquerdo do gráfico, mostrando que o movimento vibratório de precessão do rotor ocorre em sentido oposto ao sentido de rotação em torno do seu próprio eixo; medições de Shock pulse e Envelope não apresentaram variações / indicações significativas do ensaio B1 para o B2 (conforme esperado).

Os ensaios de desbalanceamento dinâmico e em balanço também apresentaram resultados satisfatórios com predominância das técnicas: análise de fase / ODS, órbita e full spectrum, respectivamente, quanto à capacidade de detecção de defeito de desbalanceamento.

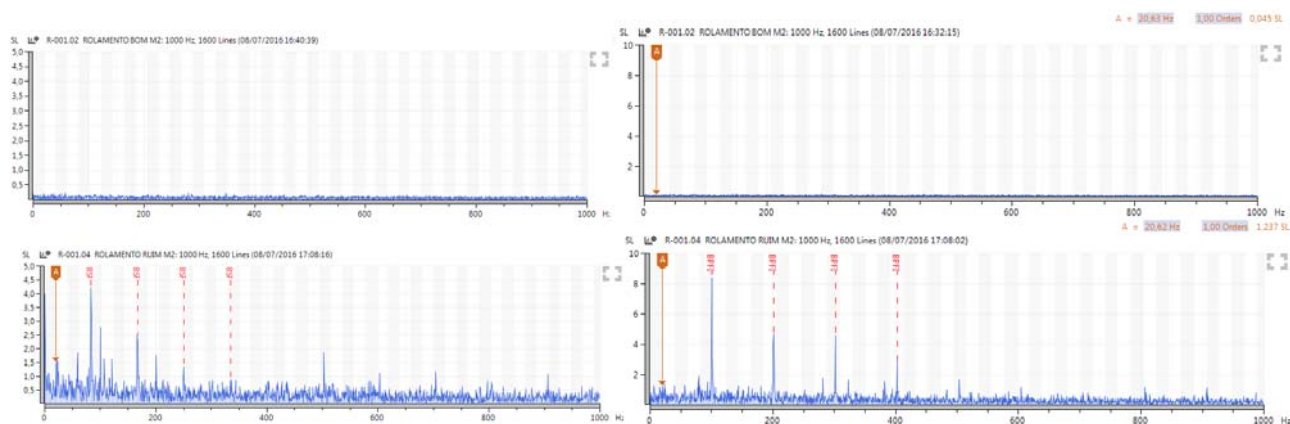
4.3. Defeitos em rolamentos

Para realização do ensaio de detecção de defeitos no rolamento foi utilizada uma configuração composta pelo motor elétrico, polias, eixo 2 e mancais 3 e 4. Os eixos 1 e 3 foram desconectados do sistema. O defeito no rolamento foi gerado utilizando um pequeno disco abrasivo fazendo um rasgo na pista externa até gerar um furo na parte de dentro da pista externa do rolamento. Os ensaios para rolamento foram divididos em: R1 (rolamento bom) e R2 (rolamento com defeito).

Tabela 06. Resultados dos ensaios R1 e R2 de avaliação da condição de rolamento.

TÉCNICA CONVENCIONAL - ENSAIOS DE ROLAMENTO								TÉCNICA SPM						
ENSAIO	RPM	MANCAL	DIREÇÃO	Vibração Rms				ENSAIO DE ROLAMENTO						
				Disp, µm	Vel, mm/s	Acc, g		RPM	R1 (BOM)		R2 (RUIM)			
R1	1237,5	M1	X	4,64	1,48	0,47		1237	dBm	dBc	dBm	dBc		
			Y	8,52	1,03	0,57			10	2	61	7		
			Z	6,22	0,90	0,55			18	2	62	7		
		M2	X	6,82	1,14	0,49			11	3	48	3		
			Y	9,37	0,77	0,42			11	4	51	3		
			Z	5,43	2,26	1,07			12	-2	33	-6		
	400	M1	X	6,88	0,86	0,33		400	13	-3	35	-6		
			Y	22,44	1,39	0,42			8	-2	26	-4		
			Z	6,52	0,59	0,33			12	-4	23	-4		
		M2	X	4,06	1,09	0,39			10	-2	22	-4		
			Y	11,92	0,67	0,36			15	-3	33	-9		
			Z	9,05	1,06	0,39			8	-3	24	-4		
			X	8,25	3,25	1,15			14	-3	23	-5		
			Y	14,80	1,48	0,69			15	-4	39	-9		
R2	1237,5	M1	Z	8,04	2,44	1,18			16	-5	25	-4		
			M2	X	14,54	2,49	0,98			13	-6	35	-6	
				Y	14,10	1,54	0,73			14	-9	45	-9	
		Z		7,09	8,85	3,11			TÉCNICA ENVELOPE					
		400	M1	X	7,57	1,37	0,38			ENSAIO DE ROLAMENTO				
				Y	14,39	0,97	0,37			ENSAIO	MANCAL	DIREÇÃO	RPM	Acc,
	Z			6,88	0,71	0,34		R1 (BOM)	M2	RADIAL	1237	2,11		
	X		7,41	1,61	0,40		400				0,75			
	M2		Y	13,62	1,39	0,41		R2 (RUIM)	M2	RADIAL	1237	13,80		
			Z	7,34	2,04	0,44					400	0,92		

As técnicas Envelope e SPM apresentaram uma resposta melhor, comparadas com as outras técnicas na identificação de defeitos em rolamentos. A técnica SPM apresentou alta sensibilidade e precisão no diagnóstico da condição do rolamento entre os ensaios R1 e R2, conforme pode ser observado na tabela 06. O espectro da técnica SPM não só apresentou aumento de amplitude (como no caso dos espectros de envelope) mas também já evidenciou frequências ressonantes de componentes do rolamento que podem ser interpretadas como frequências de defeitos.

**Figura 11. Espectros da técnica SPM para ensaio R1 (superiores) e R2 (inferiores).**

5. CONCLUSÃO E COMENTARIOS

Através das análises preliminares foram construídas as tabelas comparativas das técnicas para cada tipo de defeito utilizando o método da lógica digital. Através das tabelas geradas para cada tipo de defeito é possível identificar qual técnica é melhor aplicada para diagnosticar um tipo específico de defeito e também é possível selecionar conjuntos de técnicas mais indicadas para determinadas aplicações onde já se prevê a possibilidade de um conjunto específico de defeitos. A figura 12 mostra uma dessas tabelas e o seu respectivo gráfico, que são exemplos dos resultados finais na avaliação das técnicas selecionadas para o defeito de desbalanceamento.

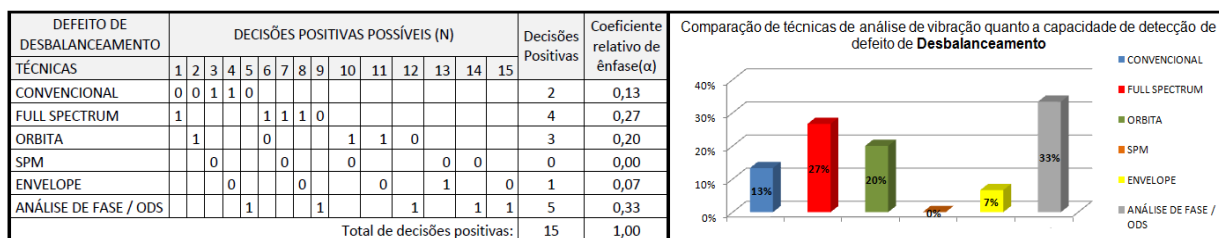


Figura 12. Resultado final de avaliação das técnicas selecionadas, para o defeito de desbalanceamento.

6. REFERÊNCIAS

- Bently, D. E., 2002, "Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics", Minden: Bently Pressurized Bearing Press.
- Brian J. Schwarz & Mark H. Richardson, 1999, "Introduction to Operating Deflection Shapes", CSI Reliability Week, Vibrant Technology Inc. Jamestown, California 95327.
- Eisenmann, R. C., & Eisenmann Jr. R., 2005, "Machinery Malfunction Diagnosis and Correction", Texas: Person Education, Inc.
- Farias, M.R., 2014, "Construção de Bancada Experimental para Análise Dinâmica de Máquinas Rotativas Horizontais", Trabalho Final de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, UERJ.
- Felício, G. M. G., 2015, "Diagnóstico de Avarias em Máquinas Rotativas Utilizando a Análise de Órbitas", Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Goldman, P., & Muszynska, A., 1999, "Application of Full Spectrum to Rotating", Orbit Magazine, 17-21.
- Greg Lee., 2015, "What is Shock Pulse?", Reability, Ludeca INC. 1425 NW 88th Avenue, Miami.
- Hans, K. H., 2003, "Envelope Analysis for Diagnostics of Local Faults in Rolling Element Bearings", Envelope Pulse™ Type 7773. Pulse is a trademark of Brüel&Kjær Sound & Vibration Measurement A/S.
- Southwick, D., 1993, "Using Full Spectrum Plots", Orbit Magazine, 19-21.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

EVALUATION OF UNCONVENTIONAL TECHNIQUES OF VIBRATION ANALYSIS FOR DETECTION OF MALFUNCTION IN ROTATING MACHINES

Marcelo dos Reis Farias, marcelo-soul@hotmail.com¹
 Paulo Roberto Farias Junior, paulofarias@id.uff.br^{1,2}
 Renato de Oliveira Rocha, rr.uerj@gmail.com¹
 Francisco José da Cunha Pires Soeiro, soeiro@uerj.br¹

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua Fonseca Teles 121 – Anexo - São Cristóvão. CEP: 20940-200,

²CEFET/RJ – Campus Nova Iguaçu, Estrada de Adrianópolis - 1.317 - Santa Rita – Nova Iguaçu/RJ. CEP: 26041-271,

Abstract: In popular terms, it has been said that "the machines speak and through sounds and vibration we can hear their complaints and diagnose their diseases". The condition monitoring of rotating machines by measuring and vibration analysis is the process in which a machine is periodically evaluated by measuring and vibration analysis, and their conditions are checked using the vibration signals. This monitoring can be carried out at three levels: 1- Overall measurement of vibration levels, to know the severity of vibration and compare with preset limits; 2- Frequency spectrum analysis to detect where it comes from vibration and possible defects; 3- Special techniques that can better detail the level, location and type of defect or malfunction. This study aims to evaluate some of these special techniques such as Full Spectrum, SPM spectrum, Orbita, phase analysis / ODS and Envelope. These techniques have been applied on an experimental rig for entering various defects in these mechanisms such as misalignment, imbalance, gear defects, problems in bearings, etc. The results obtained by each technique were evaluated and compared. The final analysis of the results is expressed using the method of digital logic for creating tables of comparative techniques for each type of defect, it is possible to identify which technique is best to diagnose a particular type of defect.

Keywords: Vibration Analysis, Defect Detection, Unconventional Techniques, Rotary Machines, Digital Logic.