

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DETECÇÃO DE DEFEITOS EM ELEMENTOS DE MÁQUINAS ROTATIVAS DE BAIXA FREQUÊNCIA ATRAVÉS DE SENSOR DE DEFORMAÇÃO PIEZOELÉCTRICO

John Cleber da Fonseca Teles, John-teles@hotmail.com¹
Alexandre Faustino Vieira, alexandrevieira.engmec@gmail.com¹
Washington Batista Lima, w_blima@yahoo.com.br¹
Marcelo de Souza Gomes, marceloszgomes@gmail.com¹
Antônio Lopes Gama, agama@vm.uff.br²
João Veneza, jopa_veneza@yahoo.com.br²

¹Universidade Santa Úrsula (USU), Rua Fernando Ferrari, 75 – Botafogo CEP: 22231-040 – Rio de Janeiro – RJ,

²Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156 – São Domingos CEP: 24210-240 – Niterói - RJ,

Resumo: Os sinais de vibração contém uma riqueza de informações complexas que caracterizam o comportamento dinâmico de uma máquina rotativa. A monitoração destes sinais em máquinas rotativas é realizada através de sensores, assim as informações de vibração são transformadas em conhecimento sobre a saúde da máquina. Neste trabalho é apresentada uma metodologia de diagnóstico dos defeitos de desalinhamento paralelo e angular em máquinas rotativas baseada na medição de deformações dinâmicas. Os ensaios foram realizados no simulador de máquinas rotativas (Rotor Kit) do fabricante SpectraQuest Inc. As deformações dinâmicas são analisadas e correlacionadas com defeitos da máquina, permitindo sua identificação e também monitoração. Os resultados das medições de deformação com o sensor piezoelétrico 740B02 da PCB, mostraram que entre os defeitos estudados a medição de pequenas deformações dinâmicas em mancais foi bastante eficiente na detecção do desalinhamento e no acompanhamento de sua evolução, principalmente, em equipamentos dinâmicos operando em baixas rotações. Constatou-se também que a técnica utilizada neste trabalho apresenta vantagens em relação à análise de vibrações convencional com uso de acelerômetros no diagnóstico de desalinhamento, em máquinas que operam em baixas rotações, onde sinais com boa relação sinal-ruído são difíceis de obter com acelerômetros.

Palavras-chave: Diagnóstico de defeitos, sensor de deformação piezoelétrico, equipamentos rotativos.

1. INTRODUÇÃO

A análise de vibração é uma técnica bastante confiável e consolidada no mercado. Esta técnica consegue detectar uma falha ou desgaste, podendo assim, detectar um desbalanceamento, desalinhamento, empeno em elementos rolantes, dentre outros (Veneza, Lima e Gama, 2015). As razões para o surgimento das vibrações que degradam um elemento rotativo são inúmeras, como menciona Bandeira et al (2010), na monitoração de um equipamento as origens de vibração mais comuns captadas se dão a rolamentos deteriorados, acoplamentos desalinhados, deformação nos eixos, folga em buchas e problemas hidráulicos. Já Veneza et al (2015) destacam outros pontos bastante significantes para a origem da vibração, como danos ocorridos no transporte, oxidação de elementos rotativos, ou ainda, podem ser provenientes de erros e descumprimento dos procedimentos de montagem, chumbamento deficiente, desnivelamento ou utilização excessiva.

Neste trabalho é apresentada uma metodologia de diagnóstico de defeitos de desalinhamento paralelo e angular de máquinas rotativas baseada na medição de deformações dinâmicas. As deformações dinâmicas foram analisadas e correlacionadas com defeitos causados propositalmente na máquina, permitindo sua identificação e também sua monitoração. Os resultados das medições de deformação que foram feitas com o sensor piezoelétrico 740B02 do fabricante PCB^{MR} mostraram que entre os defeitos estudados, a medição de pequenas deformações dinâmicas em mancais foi bastante eficiente na detecção do desalinhamento e no acompanhamento de sua evolução em equipamentos

dinâmicos operando em baixas rotações. Constatou-se também que a técnica utilizada neste trabalho apresenta vantagens em relação à análise de vibrações tradicional que faz a utilização de acelerômetros no diagnóstico de desalinhamento em máquinas que operam em baixas rotações, onde sinais com boa relação sinal-ruído são difíceis de obter com acelerômetros.

2. METODOLOGIA

A simulação dos tipos de defeitos apresentados nesse trabalho foi realizada em uma bancada de testes, conduzida e avaliada em parceria com a Marinha do Brasil, no Laboratório de Análises de Vibrações do Departamento de Projetos Navais. Os experimentos foram realizados no simulador de falhas em máquinas rotativas (*Machinery Fault Simulator Lite®*) do fabricante *SpectraQuest Inc.* (Figura 1).

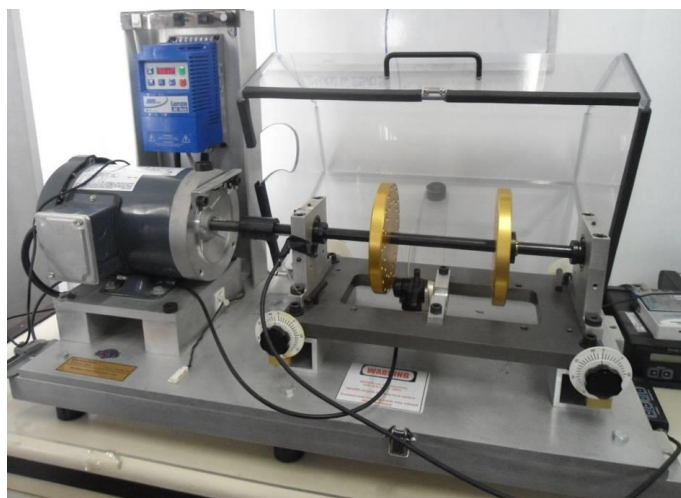


Figura 1. Bancada utilizada para a simulação de defeitos em máquinas rotativas

Os testes desenvolvidos foram feitos com diversas configurações para avaliar as deformações dinâmicas causadas pelos desalinhamentos de eixos angular e paralelo, em 3 (três) principais frequências consideradas baixas para elementos rotativos: 1Hz (60rpm), 3 Hz (180 rpm) e 5 Hz (300 rpm), e todas as configurações com acoplamento rígido. Para facilitar o entendimento a Tab. 1 abaixo ilustra os ensaios realizados.

Tabela 1. Condições dos testes realizados no Laboratório de Análises de Vibração, na Marinha do Brasil.

Desalinhamentos	Δ (mm)	Acoplamento	Velocidade de Rotação (Hz)
Paralelo	0	Rígido	1
	0.25		
	0.50		
	0.75		
	1		
Angular			3
			5

As deformações nas estruturas de uma máquina são devidas aos seus defeitos que produzem carregamentos dinâmicos. Para mensurar essas deformações e monitorar a sua evolução foi utilizado sensor de deformação piezoelétrico da PCB. As deformações sensibilizam o sensor piezoelétrico que capta deformações na proporção da ordem de 10-6m/m, que equivale a *microstrain* como ressalta Veneza (2014) em sua dissertação de mestrado “Estudo Sobre Diagnóstico de Defeitos Em Máquinas Rotativas Através da Análise de Deformações”.

Nos testes realizados, o sensor piezoelétrico foi fixado no mancal mais próximo do motor, com adesivo instantâneo universal aplicado por toda a sua base. Neste ponto o sensor capturou as deformações causadas pelos carregamentos dinâmicos no mancal da máquina, carregamentos resultantes do eixo do equipamento rotativo. Após o sensor detectar os sinais elétricos oriundos das deformações dinâmicas, o diagnóstico do equipamento foi feito em um sistema de aquisição e análise de sinais que recebe esses dados diretamente do sensor. O arranjo do teste experimental do sensor é representado na Fig. 2.

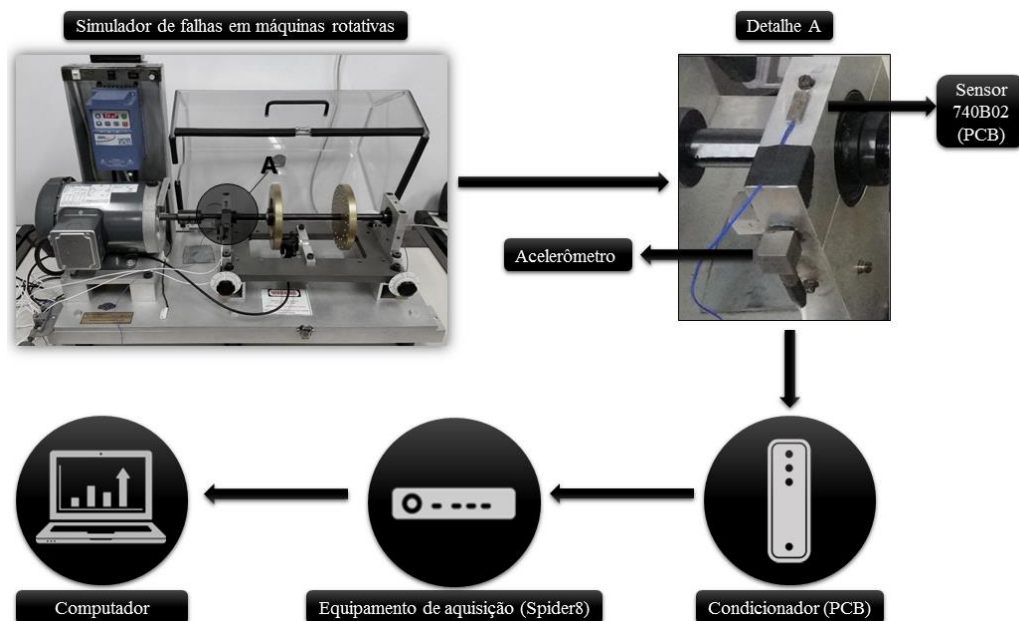


Figura 2. Arranjo experimental para aquisição e análise dos dados capturados pelo sensor piezoelétrico.

Para desenvolver os testes foram instalados o sensor piezoelétrico no mancal, um acelerômetro horizontal (Ach) e um acelerômetro axial (Aca). Cada acelerômetro registra as acelerações de acordo com sua localização na estrutura, deste modo, acelerações horizontais são captadas pelo acelerômetro horizontal e acelerações axiais pelo acelerômetro axial. O principal objetivo para utilização dos acelerômetros foi para comparar e verificar a metodologia empregada neste trabalho com a empregada no mercado atualmente, possibilitando observar a vantagens do uso do sensor piezoelétrico na medição de deformações dinâmicas, relativamente, aos acelerômetros que são os elementos tradicionalmente utilizados para diagnóstico de defeitos em máquinas rotativas.

A princípio foram observados resultados de eficiência bastante satisfatório no método proposto ao detectar um desalinhamento, por conta desse defeito produzir esforços consideráveis nos mancais. Além do mais, foram observadas vantagens na utilização do sensor de deformação em relação aos acelerômetros de alta sensibilidade (1000 mV/g), em baixas frequências, onde a detecção de desalinhamento com o sensor obteve melhores resultados nas mesmas condições de operação. Assim, o defeito em foco neste trabalho foi o desalinhamento angular e paralelo entre eixos, em velocidade de rotação em 1Hz (60rpm) 3 Hz (180 rpm) e 5 Hz (300 rpm).

Como mostrado na Fig. 3, abaixo, os desalinhamentos angulares e paralelos entre eixos foram provocados através de ajustes na bancada de simulação. Inicialmente, o desalinhamento angular foi realizado da seguinte forma, os parafusos mais próximos do eixo foram conservados intactos, enquanto os mais distantes do acoplamento foram movidos para reproduzir o desalinhamento desejado. O desalinhamento angular é mensurado de acordo com o deslocamento linear, em mm, que será aplicado no parafuso do mancal que é mais distante do acoplamento, por cada 100 mm de comprimento do eixo. Já para o desalinhamento paralelo, os parafusos mais próximos e mais distantes do acoplamento foram operados igualmente de forma a aplicar o desalinhamento em questão. O desalinhamento é mensurado em função do deslocamento linear, em mm, que é dado igualmente para ambos parafusos dos mancais.

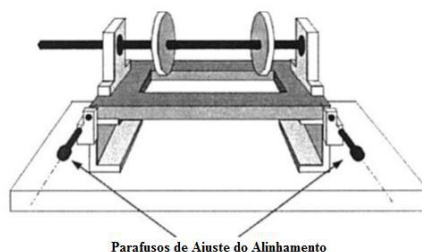


Figura 3. Procedimento para provocar um desalinhamento. Fonte: *Machine fault Simulator Manual (Spectra Quest Inc.)*

3. RESULTADOS & DISCUSSÃO

Os resultados das medições de deformação e aceleração que serão apresentados foram coletados a partir do mancal da bancada de testes. Os gráficos contrastam o desempenho dessa nova metodologia aqui apresentada, que faz o uso do sensor piezoelétrico 740B02 da PCB, com os convencionais acelerômetros, na detecção e evolução de desalinhamentos paralelo e angular em máquinas rotativas em baixas frequências.

3.1. Desalinhamento Angular (DA)

O sensor e os acelerômetros foram submetidos a diferentes níveis de desalinhamento angular em diferentes velocidades (1Hz, 3Hz e 5Hz) e com acoplamento rígido entre o eixo do rotor e motor. A Fig. 4, a Fig. 5 e a Fig. 6 ilustram espectros de frequência de dados coletados com: (a) sensor piezoelétrico 740B02 da PCB (b) acelerômetro axial e (c) acelerômetro horizontal.

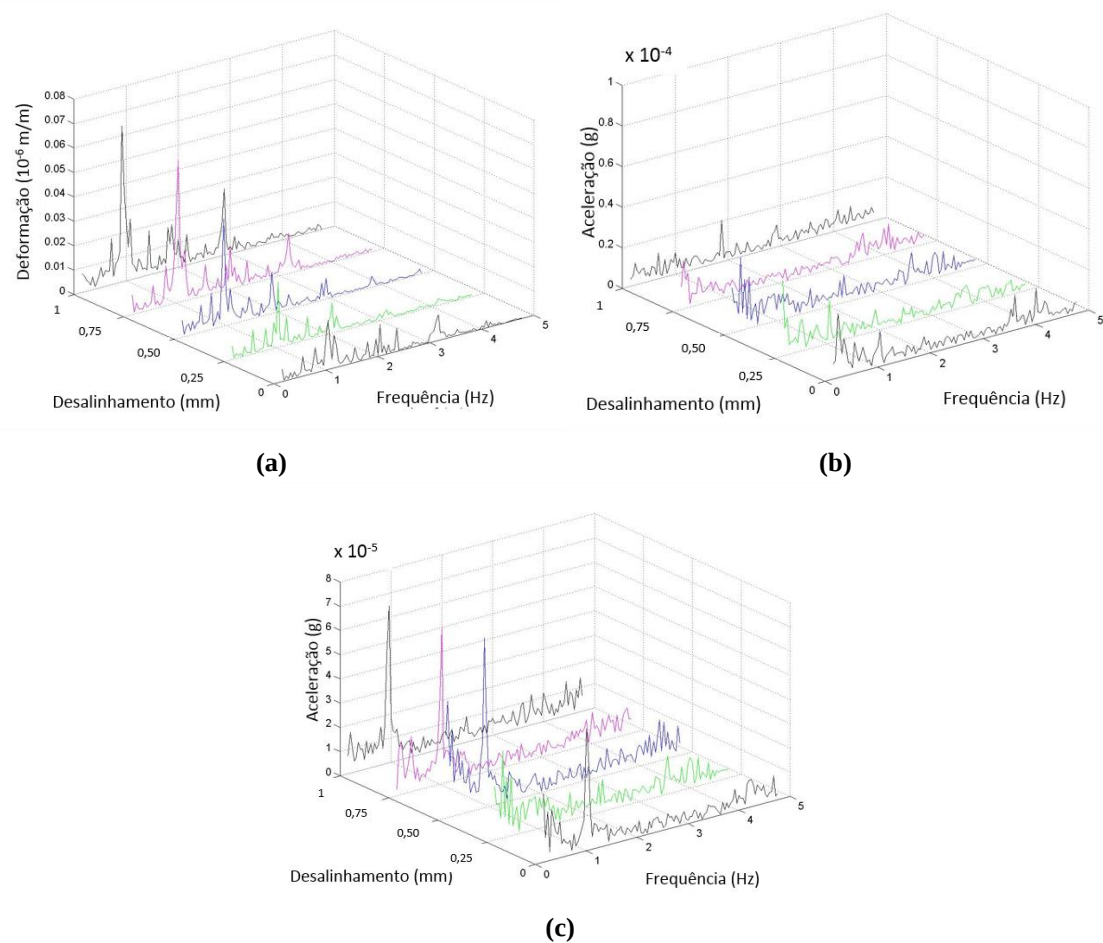


Figura 4. Espectros de frequência do (a) sensor piezoelétrico da PCB, do (b) acelerômetro axial e (c) do acelerômetro horizontal, expostos a desalinhamento angular e velocidade de 1 Hz de frequência.

A 1 Hz de frequência é possível notar no espectro de deformação (a) a amplitude aumenta gradativamente com o desalinhamento imposto na máquina rotativa, em 1X da velocidade de rotação, desde o menor até o maior desalinhamento aplicado. Na medição das acelerações, em (b) não é possível perceber o desenvolvimento do desalinhamento angular, assim como na medição (c), é possível perceber que há um desalinhamento, porém, não há como monitorá-lo.

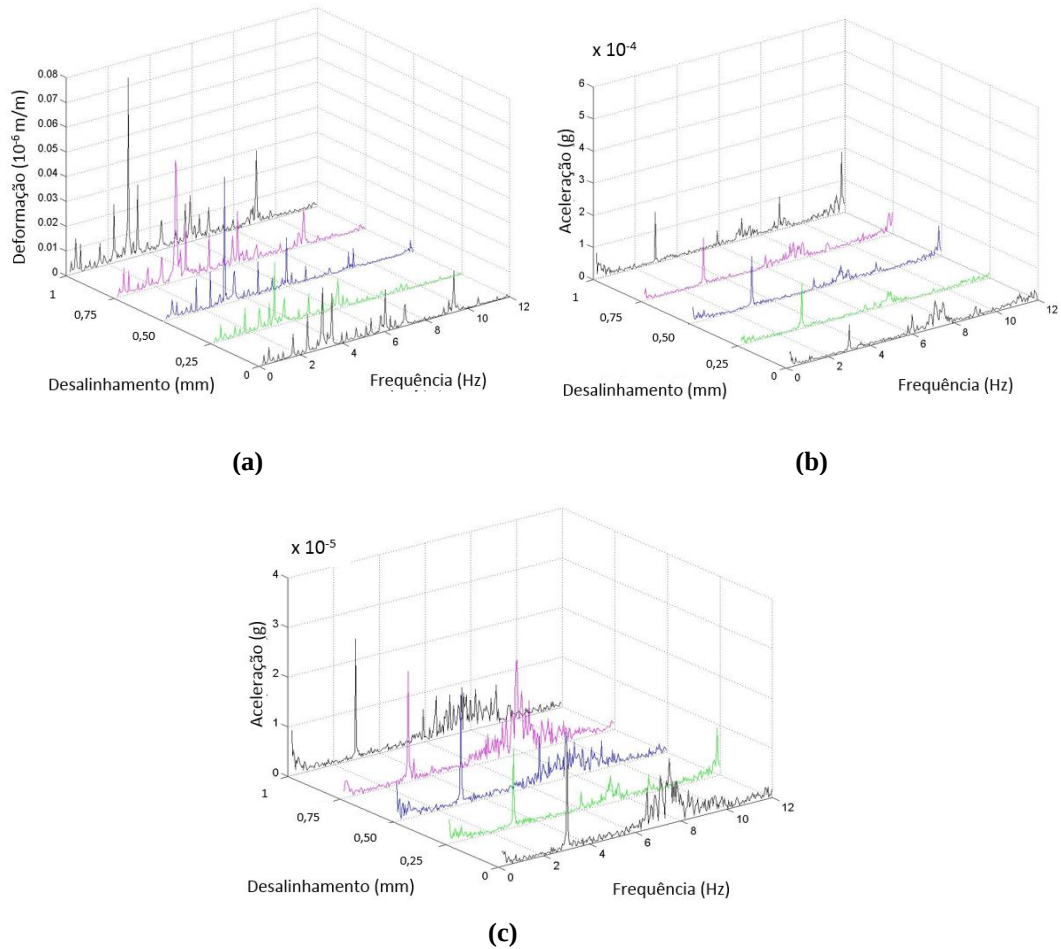
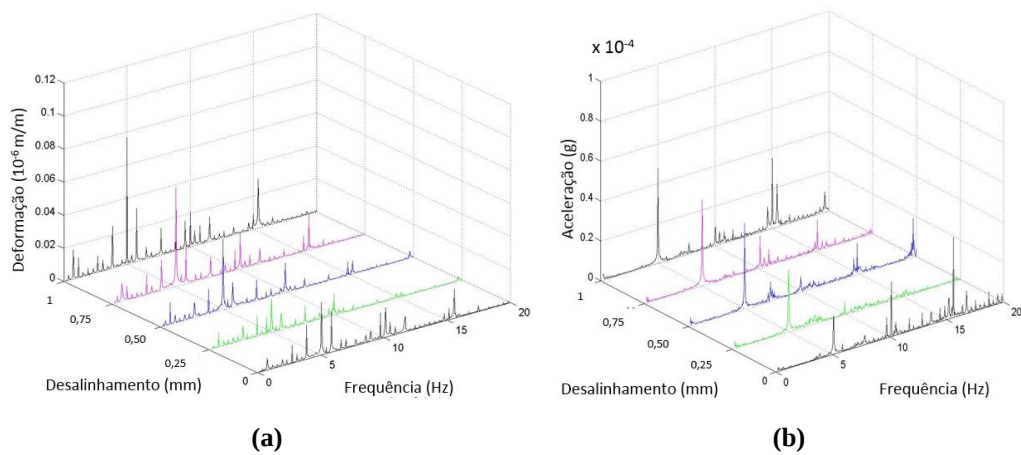
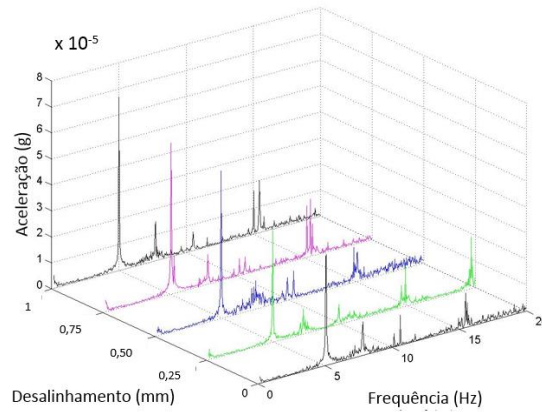


Figura 5. Espectros de frequência do (a) sensor piezoelétrico da PCB, do (b) acelerômetro axial e (c) do acelerômetro horizontal, expostos a desalinhamento angular e velocidade de 3 Hz de frequência.

Com a máquina na velocidade de 3 Hz de frequência também conseguimos observar em (a) um crescimento gradual do defeito aplicado, tanto em 1X (3Hz) quanto em 2X (6Hz) da velocidade. No espectro de frequência da aceleração axial em (b) são vistos comportamentos diferenciados da amplitude em 1X, porém não há aumento significativo que proporcione uma conclusão da evolução do problema imposto, o mesmo acontece em (c), aceleração horizontal.





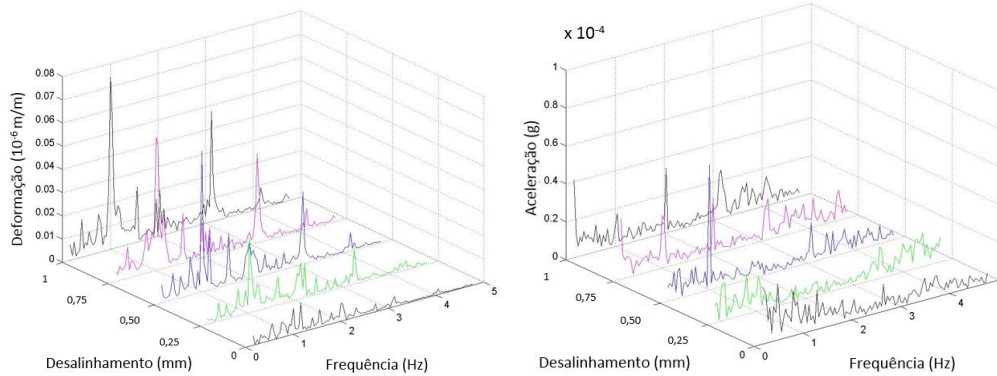
(c)

Figura 6. Espectros de frequência do (a) sensor piezoelétrico da PCB, do (b) acelerômetro axial e (c) do acelerômetro horizontal, expostos a desalinhamento angular e velocidade de 5 Hz de frequência.

Nota-se em (a) que apesar de uma pequena queda na amplitude, no segundo desalinhamento proposto (0,25 mm), que há um padrão entre as amplitudes proporcionando a percepção de aumento junto com o desalinhamento em 1X (5Hz) e em 2X (10Hz) da velocidade. Em (b) há um progresso de 0 mm para 0,25 mm de amplitude com o desalinhamento em 1X da velocidade, mas a partir de 0,50 mm os picos se estabilizam. Em (c) as amplitudes da aceleração no espectro de frequência são mais perceptíveis em 1X da velocidade, porém não há acréscimo gradual com o defeito simulado.

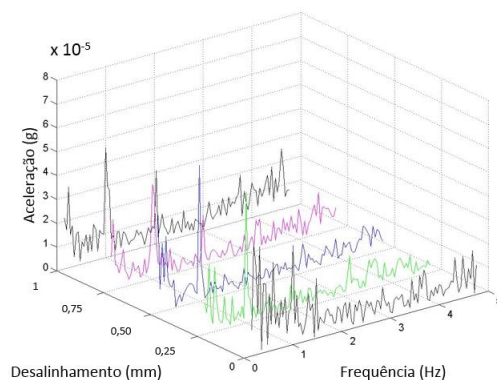
3.2. Desalinhamento Paralelo (DP)

O sensor e os acelerômetros foram aplicados aos mesmos níveis de desalinhamento paralelo, velocidades de 1 Hz, 3 Hz e 5 Hz de frequência e com acoplamento rígido entre o eixo do motor e rotor. Nas Fig. 7, Fig. 8 e na Fig. 9 demonstram o desempenho do (a) sensor piezoelétrico da PCB, do (b) acelerômetro axial e do (c) acelerômetro horizontal na detecção e evolução do defeito, através de espectros de frequência de deformação e aceleração.



(a)

(b)



(c)

Figura 7. Espectros de frequência do (a) sensor piezoelétrico da PCB, do (b) acelerômetro axial e (c) do acelerômetro horizontal, expostos a desalinhamento paralelo e velocidade de 1 Hz de frequência.

É notado em (a) um padrão no crescimento da deformação em 1X da velocidade (1Hz). Já nos dados referentes a aceleração em (b) e (c) não é possível extrair resultados precisos por não haver relação clara entre o aumento do problema aplicado e as amplitudes do eixo de aceleração (g).

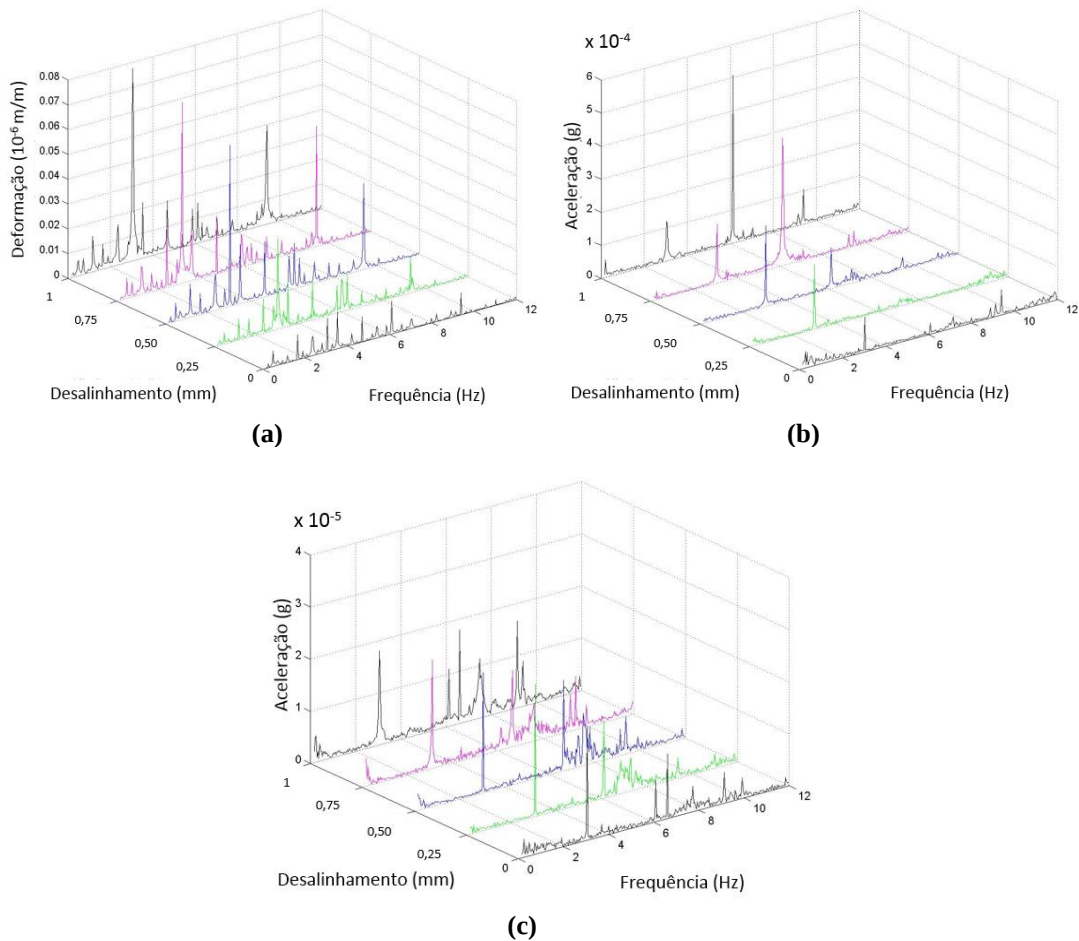
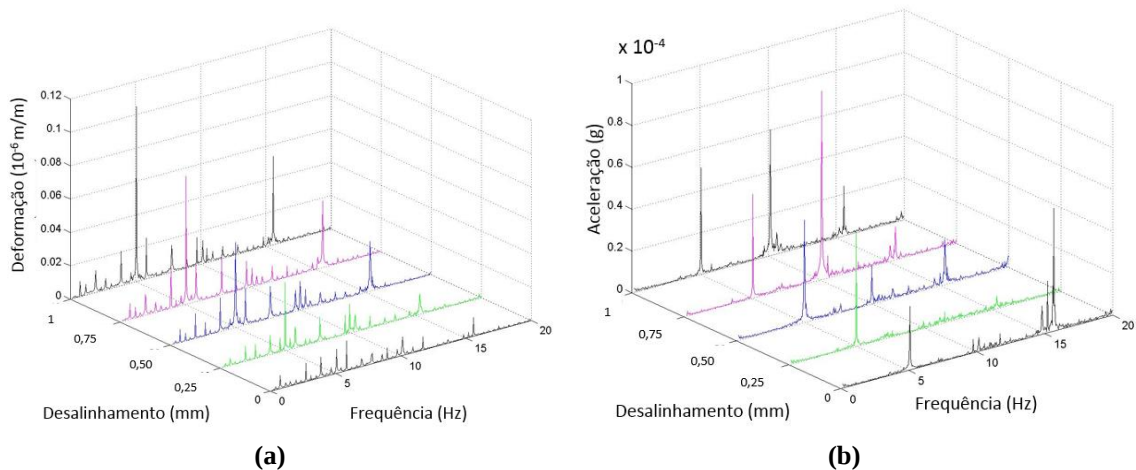


Figura 8. Espectros de frequência do (a) sensor piezoelétrico da PCB, (b) da aceleração axial e (c) da aceleração horizontal, expostos a desalinhamento paralelo a 3 Hz de frequência.

Em uma velocidade de 3Hz de frequência percebe-se claramente a magnitude e o progresso da deformação ao longo do eixo de desalinhamento, em 1X (3Hz) da velocidade de rotação da máquina. Em (b) é notável picos de aceleração em 1X, que não existe relação, porém é em 2X da velocidade de rotação que perceber-se um aumento gradativo nas amplitudes de aceleração. Em (c), aceleração horizontal, não há correlação aparente com o defeito.



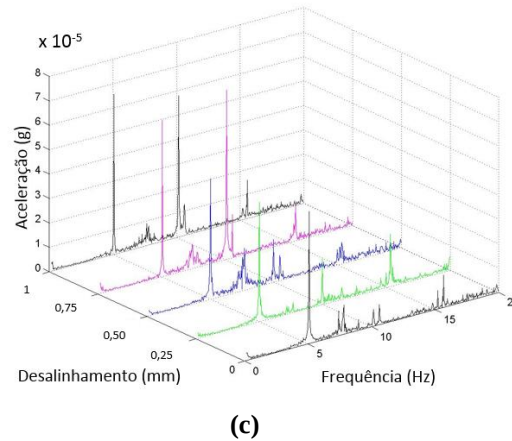


Figura 9. Espectros de frequência do (a) sensor piezoelétrico da PCB, (b) da aceleração axial e (c) da aceleração horizontal, expostos a desalinhamento paralelo a 5 Hz de frequência.

No espectro de deformação em (a) nota-se que em 1X (5Hz), 2X (10Hz) e 3X (15Hz) da velocidade existe um incremento na amplitude relacionado ao desalinhamento. No espectro de aceleração em (b) é notado picos em 1X, 2X e 3X da velocidade, contudo somente é possível observar vínculo entre amplitude de aceleração a partir de 0,75 mm de desalinhamento, em 2X da velocidade. Assim como em (c) que é visto relação após a aplicação de 0,50 mm de desalinhamento, em 1X da velocidade de rotação da máquina.

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho apresentaram o bom desempenho de uma nova metodologia de análise de vibrações para diagnosticar desalinhamentos em elementos rotativos em baixas frequências. Essa nova técnica mensura as deformações dinâmicas do mancal utilizando o sensor de deformação piezoelétrico da PCB, que possui sensibilidade de 50mV/ $\mu\epsilon$ e *range* de frequência a partir de 0,5 Hz. As análises de sinais foram feitas em domínio do tempo e convertidas para domínio da frequência utilizando a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformation - FFT*), obtendo assim, os espectros de frequência de sinal para diagnosticar a excitabilidade que o desalinhamento provoca no mancal. Em virtude da alta sensibilidade do sensor de deformação constatou-se a sua capacidade de identificar desalinhamentos em pequenos níveis, monitorando a saúde do equipamento. Os resultados ainda apontaram vantagens quando comparado ao método tradicional que emprega acelerômetros possuindo sensibilidade igual a 1000mV/g e faixa de frequência a partir de 0,5Hz.

5. REFERÊNCIAS

- Almeida, M. T. D.; Vale Almeida, F. R. D., 2013, “Princípios De Diagnósticos De Defeitos Em Máquinas Rotativas”. Itajubá: IVMTA - Instituto De Vibração MTA.
- Bandeira, G.; De Abreu, G.; Gianelli, R., 2010, “Vibração E Ruído Em Manutenção Preditiva”. Unesp. Bauru, p. 6-19.
- Veneza, J. P. S.; Lima, W. B.; Gama, A. L., 2015. Diagnóstico De Defeitos Em Máquinas Rotativas Através Da Análise De Deformações Dinâmicas. COTEQ2015 - 018 - 13ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos.
- Veneza, J. P. S., “ESTUDO SOBRE DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS EM MÁQUINAS ROTATIVAS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES”, Dissertação (Mestrado em Montagem Industrial), UFF, 2014, Niterói/RJ.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DETECTION OF DEFECTS IN ELEMENTS OF ROTARY MACHINES OF LOW FREQUENCY THROUGH PIEZOELECTRIC SENSOR OF DISTORTION DYNAMICS

John Cleber da Fonseca Teles, John-teles@hotmail.com¹
Alexandre Faustino Vieira, alexandre Vieira.engmec@gmail.com¹
Washington Batista Lima, w_blima@yahoo.com.br¹
Marcelo de Souza Gomes, marceloszgomes@gmail.com¹
Antônio Lopes Gama, agama@vm.uff.br²
João Veneza, jopa_veneza@yahoo.com.br²

¹Santa Úrsula University (USU), 75 Fernando Ferrari St. – Botafogo Postcode: 22231-040 – Rio de Janeiro – RJ,

²Fluminense Federal University, 156 Passo da Pátria St. – São Domingos Postcode: 24210-240 – Niterói - RJ,

Abstract. *Vibration signals contain rich information that characterize the complex dynamic behavior of a rotating machine. Sensors perform the monitoring of these signals in rotating machines, so the vibration information is transformed into knowledge about the health of the machine. This paper will present a methodology of diagnostic for imbalance defects, parallel and angular misalignment of rotating machines based on the measurement of dynamic deformations. The experiments were performed in rotating machines simulator (Rotor Kit) from manufacturer SpectraQuest. Dynamic deformations are analyzed and correlated with machine defects, allowing identification and, also, monitoring. The results of the strain measurements with the piezoelectric sensor 740B02 of PCB showed that among the defects studied, the measurement of small dynamic deformations in the bearings was very efficient in the detection of misalignment and the monitoring of their evolution, particularly in dynamic equipment operating at low rotations. It was also found that the technique used in this study has advantages over the conventional analysis of vibration which uses accelerometers in the diagnosis of misalignment on machines that operate at low speeds, that signals with good signal- noise ratio are difficult to obtain with accelerometers.*

Keywords: *Diagnostic of defects, piezoelectric strain sensor, rotating equipment.*