

Assinale a área do painel:

- Painel 1. Engenharias**
- Painel 2. Tecnologia e Gestão Estratégica**
- Painel 3. Governo, Espaço e Política**
- Painel 4. Educação e Ensino**
- Painel 5. Ciência, Tecnologia e Sociedade**

ESTUDO DO DESBALANCEAMENTO ROTATIVO ATRAVÉS DA ANÁLISE DE ÓRBITAS

Fábio Camargo Rosa¹, Carlos Frajuca², Cesar da Costa³

RESUMO: A análise da órbita do eixo é de suma importância para monitorar falhas em máquinas rotativas e fazer um diagnóstico associado para reparo. O desenvolvimento de procedimentos experimentais e de ferramentas computacionais aplicadas ao tratamento e monitoramento de grandezas dinâmicas que descrevem o comportamento de máquinas em condições operacionais é fundamental para o projeto e manutenção de máquinas rotativas. Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre o conceito de análise de órbita aplicado ao diagnóstico de falhas em máquinas rotativas, especificamente desbalanceamento de rotor, cujo exemplos dessas máquinas são bombas hidráulicas e turbinas utilizadas na geração de energia da matriz energética nacional. O objetivo desta pesquisa é desenvolver uma configuração experimental para estudar e testar a técnica de análise de órbita, utilizando métodos analíticos e experimentais. Os resultados experimentais indicam boa correlação entre o formato teórico da órbita e a órbita obtida do ensaio experimental.

PALAVRAS-CHAVE: desbalanceamento. detecção de falha. máquina rotativa. processamento de sinal. análise de órbitas.

STUDY OF ROTATIONAL UNBALANCE USING ORBIT ANALYSIS

ABSTRACT: Shaft orbit analysis is extremely important for monitoring failures in rotating machines and making an associated diagnosis for repair. The development of experimental procedures and computational tools applied to the treatment and monitoring of dynamic quantities that describe the behavior of machines under operational conditions is fundamental for the design and maintenance of rotating machines. This work presents an experimental study on the concept of orbit analysis applied to the diagnosis of faults in rotating machines, specifically rotor unbalance, examples of which include hydraulic pumps and turbines used in the generation of energy in the national energy matrix. The objective of this research is to develop an experimental setup to study and test the orbit analysis technique, using analytical and experimental methods. The experimental results indicate a good correlation between the theoretical shape of the orbit and the orbit obtained from the experimental test.

KEYWORDS: unbalance. fault detection. rotary machine. signal processing. orbit analysis.

INTRODUÇÃO

Os equipamentos rotativos são um dos principais tipos de máquinas utilizadas no mundo contemporâneo para diversas aplicações. Geralmente, esse tipo de maquinário é utilizado para produção de energia, transporte de fluidos, processamento de alimentos e diversos outros fins e tornou-se parte integrante de qualquer setor industrial. Portanto, é de vital importância ter um conhecimento profundo e uma melhor compreensão de como funciona

¹ IFSP, Hortolandia/SP, E-mail: fabio.rosa@ifsp.edu.br

² IFSP, São Paulo/SP, E-mail: frajuca@ifsp.edu.br

³ IFSP, São Paulo/SP, E-mail: ccosta@ifsp.edu.br

(KORPELA, 2020). Máquinas rotativas são equipamentos mecânicos que funcionam girando em torno de um eixo e sua capacidade em gerar energia mecânica vem da alta velocidade a qual seu eixo é submetido. Grande parte desta energia é rotacional e uma parcela é chamada vibracional. Bombas, turbinas, caixas de câmbio, compressores e motores são alguns exemplos desses tipos de equipamentos (SCHMID, HAMROCK e JACOBSON, 2013).

Pequenos níveis de vibrações ambientais são aceitáveis. Entretanto, níveis mais elevados e tendências crescentes são sintomas de desempenho anormal da máquina. Muitos métodos de monitoramento de condição foram propostos para diferentes tipos de detecção e localização de falhas em máquinas rotativas (ROSA e JÚNIOR, 2015). A análise de vibrações de máquinas é uma das ferramentas importantes para identificação de falhas em máquinas. Em muitas situações, métodos de monitoramento de vibração são utilizados para detectar a presença de falhas incipientes (DA COSTA e DA COSTA, 2021).

Neste contexto, os sensores podem ser usados para coletar informações de uma máquina rotativa com a finalidade de monitoramento preventivo de falhas. Esses sensores podem medir tensões e correntes, posição e velocidade do rotor, torque de saída, e vibrações da caixa, entre outros. Além disso, uma medição e análise de vibração em tempo real pode monitorar uma variedade de falhas. Com este propósito, muitos métodos de diagnóstico foram desenvolvidos até agora, esses métodos para identificar falhas em máquinas rotativas podem envolver diferentes tipos de campos da ciência e tecnologia (NANDI, TOLIYAT e LI, 2005).

A aplicação e a difusão dos conceitos e da técnica de análise orbital apresentam como características a detecção *on-line* de falhas de desbalanceamento. Grandezas a serem medidas são de fácil obtenção, tais como vibrações mecânicas, rotação do eixo e fase e possui um procedimento de medição não invasivo, ou seja, não necessita desmontar a máquina. Como contribuição, este trabalho apresenta um estudo com testes experimentais para a detecção (análise e diagnóstico) de falha por desbalanceamento por meio da análise de órbitas, com aquisição e processamento de sinais *on-line*.

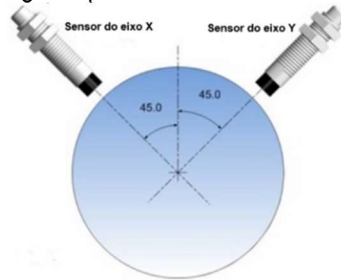
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A análise de vibração é usada para determinar as condições mecânicas, elétricas e operacionais do equipamento. Como principal vantagem, esta análise pode identificar problemas no desenvolvimento antes que estes se tornem críticos. Um sistema de análise de vibrações geralmente contém quatro componentes: (i) sensores para coleta de dados; (ii) um analisador de sinal; (iii) *software* compatível; e (iv) um computador para análise e armazenamento de dados. (YAMAMOTO, DA COSTA e DA SILVA SOUSA, 2016).

O monitoramento de vibração pode detectar defeitos como deterioração de rolamentos, desalinhamento, desbalanceamento, folgas mecânicas, dentes de engrenagens quebrados. Transdutores industriais são usados para medições de características dinâmicas do equipamento, normalmente são divididas em duas categorias distintas: acelerômetros e de proximidade, usados principalmente para medir oscilações do eixo. Os transdutores dinâmicos medem eventos que ocorrem em pequenos intervalos de tempo. Estes transdutores usados para medir vibrações podem detectar um fenômeno específico que ocorre em frações de segundos. Os sinais eletrônicos resultantes das medições desses transdutores podem ser apresentados em gráficos, contendo informações significativas e sendo quantificados de acordo com amplitude, fase, frequência, formato do sinal e posição (DA COSTA, *et al.*, 2010).

A montagem padrão consiste em dois sensores de deslocamento montados em posição ortogonal padrão 45° e 135°, sincronizados ou não, por um terceiro sensor com função de reconhecer o sentido de precessão do movimento (LITRELL e BELL, 2009). A informação obtida pode ser apresentada utilizando dois sinais de tempo individuais, respectivamente, para cada sensor, mas idealmente pode ser desenhado um gráfico que represente as duas dimensões do movimento do eixo, formando uma órbita (MONTE, VERBELEN e VERVISCH, 2015). A Figura 1 ilustra a orientação angular típica de um par de sensores de proximidade.

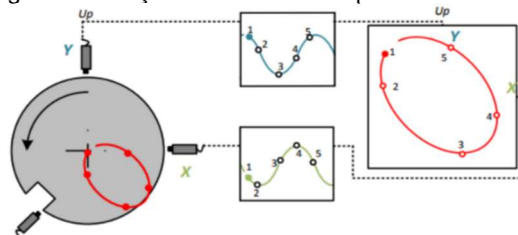
Fig.1. Montagem típica dos sensores de deslocamento



Fonte: (DA COSTA *et al.*, 2017).

A órbita representa a trajetória do centro do eixo em um plano de leitura. Os sinais de vibração lateral do rotor indicam movimentos oscilantes do eixo apenas em uma direção. Quando um sensor é posicionado perpendicularmente ao outro, é possível acompanhar o movimento bidimensional da vibração observando o caminho ao qual o centro do rotor se move. Este movimento em um plano é conhecido como movimento orbital do rotor (HONGXIN, *et al.*, 2013). A órbita de um rotor representa o caminho da linha central de um determinado eixo em relação ao par de sensores perpendiculares nele instalados. Além da órbita obtida experimentalmente, a modelagem numérica permite a visualização dessas órbitas em uma determinada rotação e posição do rotor, bem como com os modos de vibração (YANG, *et al.*, 2015). A Figura 2 mostra a progressão do centro do eixo em torno de sua órbita.

Fig.2. Construção da órbita obtida pelos sensores XY

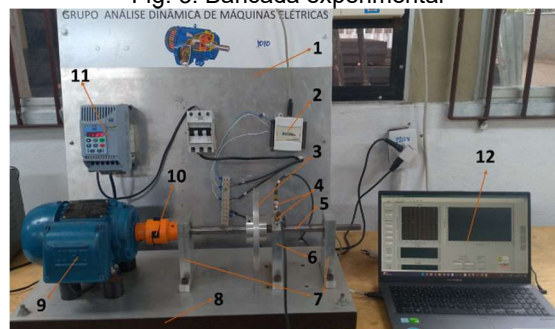


Fonte: (DA COSTA *et al.*, 2018).

METODOLOGIA DA PESQUISA

Um modelo de configuração experimental para o estudo da análise de vibrações e seu comportamento dinâmico foi implementado neste trabalho. A configuração experimental desenvolvida representa uma combinação de máquinas rotativas encontradas em aplicações industriais. Para obter as órbitas do eixo de uma máquina rotativa, uma bancada de testes de rotor flexível foi construída no laboratório de Análise Dinâmica de Máquinas Elétricas e Eficiência Energética (ADMEEE) no Instituto Federal de São Paulo – Campus São Paulo. A Figura 3 ilustra a montagem do aparato experimental.

Fig. 3. Bancada experimental



Fonte: ADMEEE

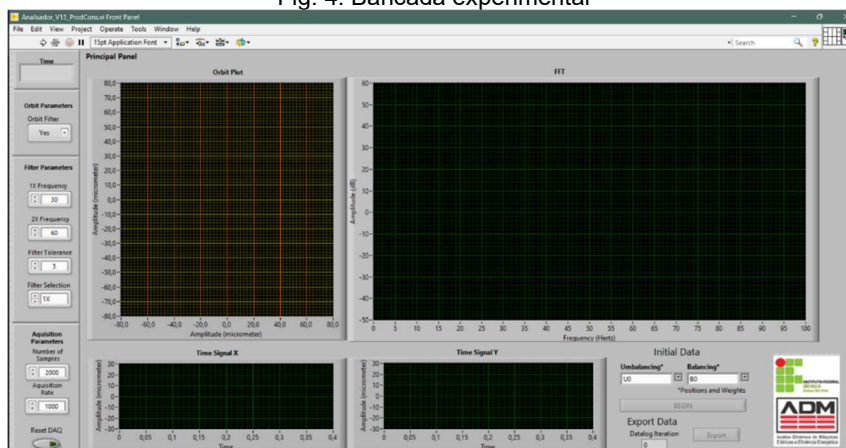
Os componentes da bancada experimental são:

1. Estrutura da bancada em alumínio 6351, destinada a acomodar os controles eletrônicos e suportar o conjunto mecânico;
2. Sistema de aquisição de dados (DAQ) modelo NI 6008 USB da *National Instruments*;

3. O disco usinado em alumínio 6351 possui furações coordenadas a 90° e distribuídas em dois círculos concêntricos, para gerar o desbalanceamento;
4. Sensores de proximidade Indutivo modelo IWRM 08U9501/S35 da *Baumer Electric AG*;
5. Eixo, em aço SAE 1020, com Ø16 por 255 mm e rebaixos nas extremidades de Ø12 por 72,5 mm para montagem dos rolamentos;
6. Suporte dos sensores, no qual foram previstos parafusos de ajuste que possibilitam o ajuste de posição rápido, mesmo com o equipamento em funcionamento;
7. Mancais, destinados a suportar os esforços advindos do desbalanceamento, com alojamento para rolamentos de esferas auto lubrificadas numeração 6201 ZZ;
8. Base reforçada por uma placa de compensado 50 mm de madeira recoberta por chapa 2 mm de alumínio;
9. Motor trifásico de indução de 0,25 cv, rotor em gaiola de esquilo, 4 polos, tensão nominal de 220/380 V e rotação nominal de 1710 rpm;
10. Acoplamento elástico resistente até 5° de desalinhamento angular, frequência de referência de 25.000 rpm, e torque nominal de operação 2,3 Nm;
11. Inversor de frequência para o acionamento, controle e variação de frequência do motor elétrico, corrente de saída de 1,0 a 33 A (0,25 a 20 c.v.), e controle vetorial (VVC - *Voltage Vector Control*);
12. Computador com o *software* LabVIEW® versão 2019 instalado.

Os algoritmos para monitoramento e diagnóstico do desbalanceamento foram desenvolvidos no *software* LabVIEW® com base na técnica de análise orbital gráfica, bem como na aplicação de testes de aquisição de dados utilizando sensores de proximidade. Este algoritmo é concebido por fluxo de dados e permite programar e controlar diferentes tecnologias, além de integrar uma ampla variedade de funções matemáticas dedicadas para processamento e análise de sinais. O sistema construído faz a leitura dos dois sensores, referentes aos eixos X e Y, utilizando um DAQ e os códigos gerados possuem a extensão VI. O painel de controle é mostrado na Figura 4.

Fig. 4. Bancada experimental



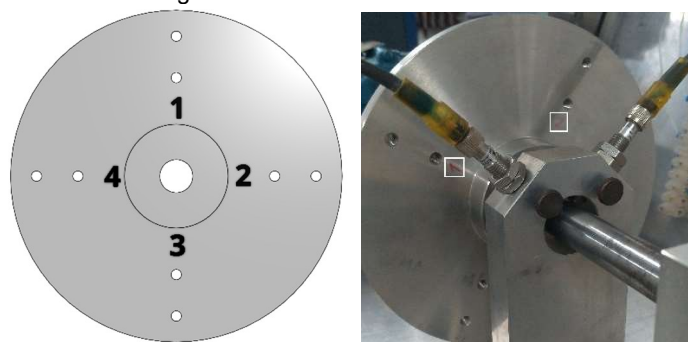
Fonte: ADMEEE

No painel frontal, há a possibilidade de configuração dos parâmetros do filtro e de ajustes na taxa de amostragem e de aquisição das órbitas. O software apresenta também os sinais temporais coletados pelos sensores e por intermédio da aplicação da FFT, apresenta o espectro de frequências. O software é responsável também pela filtragem do sinal, onde é possível escolher entre a exibição do sinal temporal e do diagrama espectral de cada sensor, além da composição dos sinais dos sensores.

Para os principais tipos de falhas existe um formato de órbita característico. A correlação entre o formato teórico da órbita e a órbita reproduzida na configuração experimental desenvolvida é verificada na prática.

O levantamento dos dados experimentais foi feito variando fisicamente as condições na bancada experimental, para posteriormente analisá-los através do método supracitado. As condições foram separadas de duas formas, uma condição normal de uso (rotor sem balanceamento), e outra condição com falha (rotor desbalanceado). A fim de promover as condições mencionadas, utiliza-se um disco no centro do eixo (rotor Jeffcot) com furos radiais, para inserção das massas, conforme mostra a Figura 5.

Fig.5. Disco sem desbalanceamento

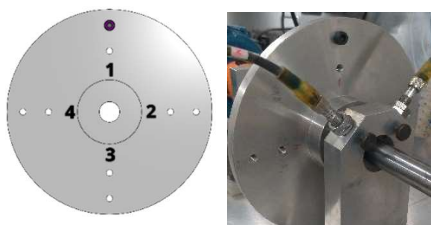


Fonte: autor

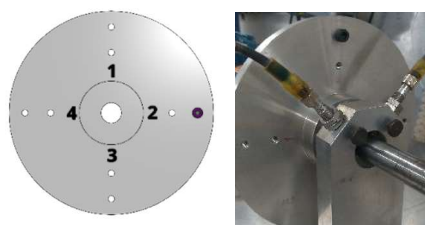
Para simular tais condições de desbalanceamento, são inseridas massas nos furos indicados no disco com o objetivo de verificar o nível de desbalanceamento do rotor, ilustrados na Figura 6.

Fig. 6. Posição e Sequência do desbalanceamento gerado

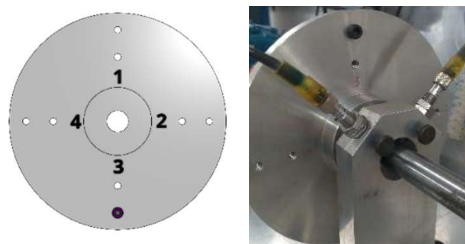
(a) Posição 1



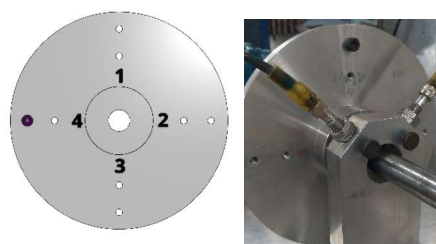
(b) Posição 2



(c) Posição 3



(d) Posição 4



Fonte: autor

O conjunto parafuso/porca (desbalanceamento) utilizado nos testes possui massa de 3, 6 e 9 g, mostrado na Figura 7.

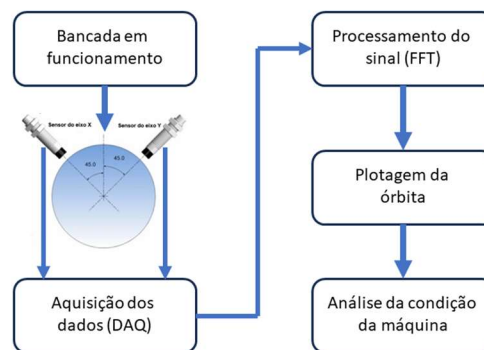
Fig.7. Conjunto de massas para gerar desbalanceamento



Fonte: autor

A arquitetura do sistema baseia-se no modelo de etapas do processamento de dados, conforme mostra a Figura 8. Este fluxograma compreende desde a etapa de coleta de dados dos sinais do rotor em funcionamento até a apresentação dos resultados com a condição de saúde do equipamento, ou seja, para cada desbalanceamento gerado, em um dos furos indicados no disco, as etapas do fluxograma serão contempladas.

Fig.8. Fluxograma do sistema de detecção de Desbalanceamento



Fonte: autor

RESULTADOS E DISCUSSÃO

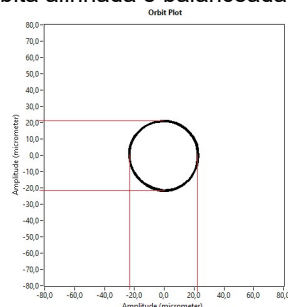
Os algoritmos para monitoramento e diagnóstico de falhas foram desenvolvidos no *software* LabVIEW® com base na técnica de análise gráfica de órbitas, bem como na aplicação de testes de aquisição de dados utilizando sensores de proximidade. Para os principais tipos de falhas existe um formato de órbita característico (JEONG *et al.*, 2016). A correlação entre o formato teórico da órbita e a órbita reproduzida no ensaio experimental é verificada na prática.

Para a oscilação do eixo é verificado o valor pico a pico do sinal de cada sensor de proximidade. Com o sinal filtrado, os picos são detectados corretamente, sendo possível traçar a órbita descrita pelo eixo. A análise espectral dos sinais dos sensores de proximidade pode ser realizada separadamente em cada sinal, aplicando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Porém, o diagnóstico mais completo é feito por meio da análise do espectro da órbita registrado com ambos os sensores.

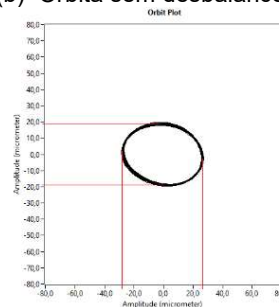
Inicialmente foi necessário posicionar os sensores com a mesma distância do eixo, para isso utilizou-se um osciloscópio, onde posicionou-se os sensores a fim de se obter uma tensão de pico a pico igual em cada sensor. Para se obter a órbita na condição de referência, Figura 9a, obteve-se os dados considerando somente o eixo do rotor, desta forma, nesta condição a máquina rotativa foi considerada alinhada e balanceada.

Fig.9. Órbitas obtidas experimentalmente

(a) Órbita alinhada e balanceada



(b) Órbita sem desbalanceamento



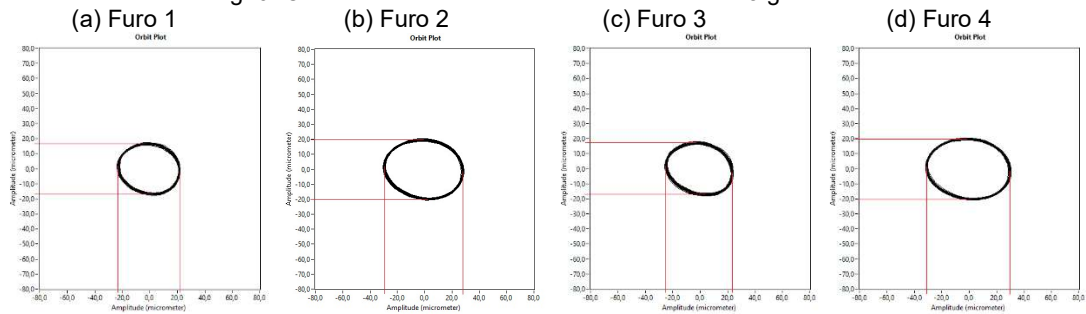
Fonte: autor

A Figura 9b mostra o resultado obtido a partir dos dados coletados considerando a configuração da bancada neste ensaio, com o disco inserido no rotor sem desbalanceamento, ou seja, em condição normal de uso. A órbita fornece todas as informações necessárias com relação à base teórica apresentada neste trabalho. Quando o rotor não apresenta nenhuma falha, sem disco de desbalanceamento, a órbita gerada deverá produzir um perfil circular

(Figura 9a). No caso apresentado (Figura 9b), disco inserido no eixo sem desbalanceamento, a órbita indica uma leve deformação no perfil, o que pode estar relacionado ao projeto e/ou processo de manufatura, ao material não homogêneo ou imperfeições na montagem.

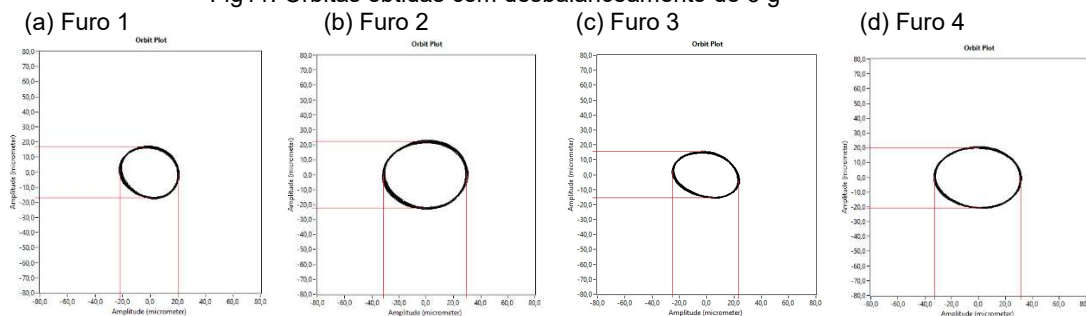
Para as condições de desbalanceamento foram obtidas as seguintes órbitas, variando-se as massas inseridas no disco, conforme mostram as Figuras 10, 11 e 12.

Fig10. Órbitas obtidas com desbalanceamento de 3 g



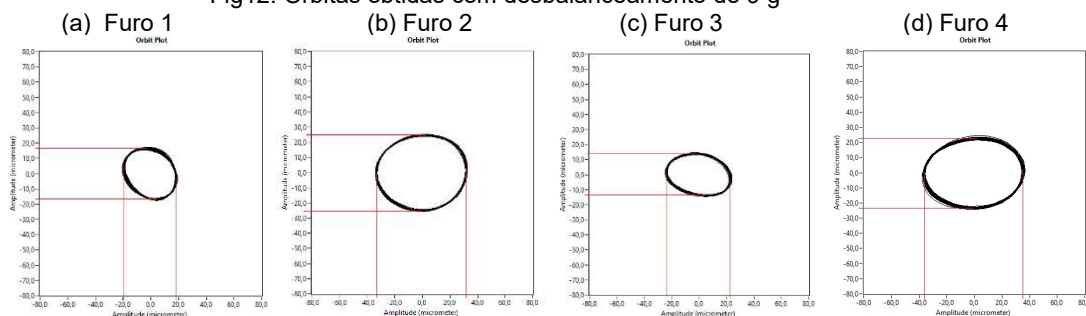
Fonte: autor

Fig11. Órbitas obtidas com desbalanceamento de 6 g



Fonte: autor

Fig12. Órbitas obtidas com desbalanceamento de 9 g



Fonte: autor

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que o espectro encontrado se correlaciona com o comportamento registrado pelos sinais dos sensores de proximidade. A possibilidade de monitorar frequências específicas ao longo do tempo e correlacionar as alterações ocorridas em determinadas frequências com falhas, por exemplo, o desbalanceamento de rotor é uma das grandes contribuições deste trabalho. Através das órbitas geradas a partir do sinal dos sensores é possível verificar, que a falha relacionada ao desbalanceamento gera uma órbita com um formato mais elíptico e que a intensidade do desbalanceamento gerado é indicada por sua variação da amplitude, ou seja, quanto maior é o desbalanceamento maior será a variação entre o rotor desbalanceado em relação ao rotor balanceado. Além disso, ao detectar uma alteração na condição operativa, com este estudo foi possível identificar o tipo de falha ocorrido, com base no padrão alterado dos componentes do espectro da órbita analisado.

REFERÊNCIAS

- DA COSTA, Caio C. O.; DA COSTA, Cesar. Quantification and Analysis of Uncertainties in Parameters of Rotors Supported by Bearings. **European Journal of Engineering and Technology Research**, v. 6, n. 2, p. 88-95, February 2021. ISSN: 2736-576X.
- DA COSTA, Cesar et al. **A new approach for real time fault diagnosis in induction motors based on vibration measurement**. Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. [S.l.]: IEEE. May 2010. p. 1164-1168.
- DA COSTA, Cesar et al. Diagnosis of Failures in Rotary Induction Machines Using Orbit Analysis, 2017.
- DA COSTA, Cesar et al. Orbit Analysis For Imbalance Fault Detection In Rotating Machinery. **IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)**, v. 13, n. 1, p. 43-53, 2018.
- HONGXIN, Zhang et al. **Study on Shaft Orbits Measurement and Identification Based on LabVIEW**. 2013 Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. [S.l.]: IEEE. January 2013.
- JEONG, Haedong et al. Rotating Machinery Diagnostics Using Deep Learning on Orbit Plot Images. **Procedia Manufacturing**, v. 5, p. 1107–1118, 2016. ISSN: 2351-9789.
- KORPELA, Seppo A. **Principles of turbomachinery**. John Wiley & Sons, 2019.
- LITTRELL, N.; BELL, A. **Application Considerations for Eddy Current Proximity Probes**. ORBIT, v. 29, n. 1, 2009.
- MONTE, Michael; VERBELEN, Florian; VERVISCH, Bram. Detection of Coupling Misalignment by Extended Orbits. In: **Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2015. p. 243–250. ISBN: 9783319152363 ISSN: 2191-5652.
- NANDI, S.; TOLIYAT, H. A.; LI, X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors - A Review. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 20, p. 719–729, December 2005. ISSN: 0885-8969.
- ROSA, Fábio C.; JÚNIOR, Milton D. **Unbalance parameters identification in rotating machines using computational procedure**. [S.l.]: ABCM. 2015.
- SCHMID, Steven R.; HAMROCK, Bernard J.; JACOBSON, Bo O. **Fundamentals of Machine Elements**. CRC Press, 2013.
- YAMAMOTO, Guilherme K.; DA COSTA, Cesar; DA SILVA SOUSA, João S. A smart experimental setup for vibration measurement and imbalance fault detection in rotating machinery. **Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 4, p. 8-18, January 2016. ISSN: 23519886.
- YANG, Lu et al. **Analysis and comparison of axis orbit characteristics in fault pattern recognition**. 2015 Chinese Automation Congress (CAC). [S.l.]: IEEE. November 2015.