

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS MÉTODOS TRADICIONAIS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO.

Elton P. Souza, elton.souza@tucurui.ufpa.br¹
Thiago B. Costa, thiago.costa@tucurui.ufpa.br¹
Lis S. Moura, lis.moura@tucurui.ufpa.br¹
Walter S. Sousa, wss@ufpa.br¹
Alexandre L. A. Mesquita, alexmesq@ufpa.br¹
André L. A. Mesquita, andream@ufpa.br¹
Danilo S. Braga, danilo@dynamox.net²

¹Universidade Federal do Pará - UFPA, Av. Brasília, s/n - Vila Permanente - 68.455-901 - Tucuruí, PA.

²Dynamox, Rod. SC 401, km 01, nº 600, Rua Parque Tecnológico Alfa, Florianópolis - SC, 88030-909.

Resumo Neste trabalho aborda-se um estudo avaliando a eficiência de técnicas convencionais de detecção de defeitos em rolamentos com diferentes valores de frequência de rotação. Inicialmente, são apresentados diferentes métodos usados para detecção de falhas em rolamentos, sendo métodos no domínio do tempo e métodos no domínio da frequência. Os sinais gerados pelos rolamentos foram adquiridos em uma bancada de laboratório por meio de acelerômetros e um analisador de frequência, modelo Nk-820 da TEKNIKAO. As técnicas nos domínios do tempo e da frequência foram implementadas no software MATLAB, sendo validadas por meio da análise em um rolamento em boas condições e outro rolamento com defeitos previamente conhecidos.

Palavras-chave: Análise de vibração. Rolamentos. Máquinas rotativas. Técnica do envelope.

Abstract. This work presents an analysis and evaluation to conventional techniques of fault detection of bearings with different values speeds. At first, will be presented the main methods in the time domains and frequency domains used to fault detection of bearings. The signals generated by the bearings were acquired on a laboratory workbench using accelerometers and a frequency analyzer, model Nk-820 from TEKNIKAO. The techniques in the time domain and frequency domains were implemented by the MATLAB software and validated through the analysis of a bearing in good condition and another with known defects.

Keywords: vibration analysis, bearings, rotating machines, envelope technique.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito da manutenção preditiva através da análise de vibrações, existem falhas mais comuns que ocorrem em grande parte do maquinário. Dessa forma, é possível mapear os defeitos que mais estão presentes neste cenário, uma vez que estes poderão ser encontrados na grande maioria. Macêdo (2015) afirma que empresas brasileiras gastam aproximadamente de 3% a 4,5% de seu faturamento anual com gastos em manutenção corretiva.

Segundo Lin *et al.* (2017) mancais de rolamentos são os componentes mais críticos de uma máquina rotativa, pois sua falha acarreta na parada da máquina causando conseqüentemente parada no processo produtivo e perda financeira. Kan (2017) informa que os problemas nos mancais correspondem a mais de 40% de todas as falhas que ocorrem em máquinas industriais e comerciais.

A análise de vibração em rolamentos é uma técnica bem estabelecida na indústria para a monitoração da condição dos rolamentos, a sua eficácia já foi provada através de diversos estudos para a detecção de falhas em mancais. Porém, é mais difícil e complicado analisar a condição dos rolamentos que operam em baixas rotações, pois os sinais de vibrações possuem baixos níveis de energia, por esse motivo, é difícil de identificar e classificar uma falha precoce em rolamentos que trabalham em baixas rotações. Sendo assim, o presente trabalho buscar investigar a aplicabilidade dos métodos convencionais de detecção de falhas em rolamentos, em função da sua rotação de trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A maneira mais comum e fundamental de analisar os sinais de vibrações é utilizando métodos estatísticos no domínio do tempo, tais como, o valor médio quadrado (RMS), valor de pico, Fator de Crista, Fator K e Fator de Curtose. Há também os métodos no domínio da frequência. A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é uma outra abordagem comum na análise de sinais. Essa técnica converte um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência utilizando a Transformada Discreta de Fourier (DFT). Esse método pode identificar e isolar certas frequências de interesse, como por exemplo as frequências características dos defeitos (ANTONIOLLI, 1999). Contudo, essas frequências características de defeitos podem estar mascaradas no espectro. Dessa forma, um refinamento na identificação de defeitos no domínio da frequência é a tradicional técnica do envelope. Abaixo, descrevem-se brevemente as características dessas técnicas citadas e usadas neste trabalho.

2.1. Técnicas no domínio do tempo

As técnicas no domínio do tempo constituem a abordagem mais simples, pois fornecem apenas indicações do aumento da vibração no rolamento, mas não fornecem informações sobre a localização dos defeitos. A seguir, segue um breve resumo das técnicas no domínio do tempo analisadas neste trabalho

- **Valor Médio Quadrado (RMS)**

O RMS é uma medida de dispersão que indica o quanto os valores individuais da série de dados estão distribuídos em relação à sua média. Desse modo, o valor médio quadrado é dado pela seguinte equação:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [(x(t)^2)]} \quad (1)$$

Sendo $x(t)$ amplitude instantânea do sinal de vibração e T o período do sinal de vibração.

- **Valor de Pico**

O Valor de Pico é definido como a máxima amplitude de um sinal temporal e pode ser representado de maneira simples através da equação:

$$X_{pico} = \max [x(t)] \quad (2)$$

Sendo $x(t)$ amplitude instantânea do sinal de vibração e $\max []$ é uma função que retorna o valor máximo do sinal.

- **Fator de Crista**

O Fator de Crista é um parâmetro no domínio do tempo que é definido a partir da razão entre o valor de pico de um sinal e seu valor RMS:

$$FC = \frac{X_{pico}}{X_{RMS}} \quad (3)$$

- **Fator K**

Para superar a limitação do Fator de Crista, foi criado o Fator K, que é o produto entre o valor RMS e o Valor de Pico do sinal, conforme a equação abaixo:

$$FK = X_{pico} * X_{RMS} \quad (4)$$

- **Fator de Curtose**

Na estatística, a Curtose é um parâmetro definido como a forma que melhor caracteriza o "achatamento" da curva em relação à função de distribuição de probabilidade. Segundo Mesquita et al. (2002), para um rolamento sem defeitos com distribuição gaussiana, o valor do Fator de Curtose é aproximadamente 3, um valor acima disso indica uma falha iminente.

Dessa forma, pode-se defini-la como:

$$Kur(x) = E \left[\left(\frac{X - \mu}{\sigma} \right)^4 \right] = \frac{E[(X - \mu)^4]}{(E[(X - \mu)^2])^2} \quad (5)$$

Sendo X o valor de amplitude do sinal, E o valor esperado, σ o desvio padrão do sinal e μ a média do sinal.

2.2. Técnicas no domínio da frequência

Mesquita *et al.* (2002) informa que os métodos no domínio do tempo só informam a existência da falha, enquanto a análise no domínio da frequência pode indicar o local da falha através das frequências características dos defeitos. Abaixo segue um breve resumo de técnicas no domínio da frequência analisadas neste trabalho.

- **Transformada Rápida de Fourier (FFT)**

A Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform - FFT) permite decompor um sinal em suas componentes de frequência individuais, o que pode ser útil para entender a natureza do sinal e extrair informações. A FFT se mostra como uma ferramenta poderosa uma vez que permite transformar sinais discretos no domínio do tempo para o domínio da frequência. Dessa maneira, considerando um sinal $f(t)$ no domínio do tempo, a sua transformada de Fourier (FTT) pode ser escrita como:

$$F(w) = F(f(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (6)$$

Sendo $f(t)$ uma função que representa o sinal no domínio do tempo, j unidade imaginária e w a frequência angular.

- **Envelope**

Outra técnica para avaliar as condições dos rolamentos é a análise de Envelope. É difícil detectar as frequências características de falha em rolamentos utilizando somente a FFT, pois componentes vibratórios espúrios podem contaminar o espectro com frequências impróprias para o que quer se analisar. Então, a análise de Envelope foi desenvolvida para substituir a análise de frequências com uma ampla faixa de frequências portadoras por uma faixa menor de frequência de falhas, melhorando a resolução. As etapas do método do Envelope de um sinal de vibração são mostradas de forma simplificada na Fig. 1:

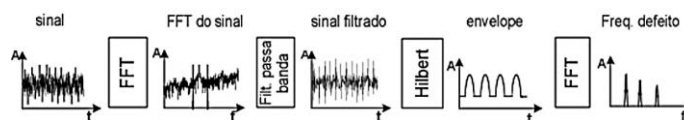


Figura 1. Etapas do método de Envelope (Bezerra, 2004)

- **Frequências características de falhas em rolamentos**

De acordo com Ponci (2005), existem frequências características de falha nos rolamentos, quando uma superfície com defeito de um elemento do rolamento entra em contato com outra superfície do rolamento é provocado um impulso através do choque excitado. Estes impulsos irão ocorrer periodicamente com uma frequência que é determinada e conhecida, pela localização do defeito, sendo ele na pista interna, na pista externa ou no elemento girante (MCFADDEN, 1984). Dessa forma, as frequências características dependem dos seguintes elementos geométricos:

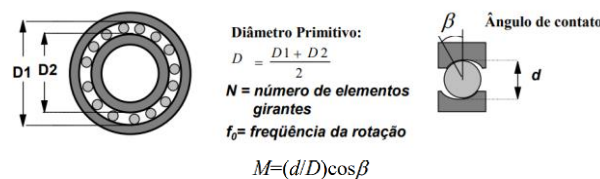


Figura 2. Frequências características do rolamento (Autor)

Portanto, para encontrar as frequências características dos elementos do rolamento, utiliza-se as seguintes expressões:

Tabela 1. Frequências características dos elementos de um rolamento

FREQUÊNCIAS FUNDAMENTAIS NOS ROLAMENTOS (para montagem pista externa parada e pista interna girando)	
Rotação da gaiola (FTF)	$f_c = 0,5 \cdot f_o \cdot (1 - M)$
Rotação do elemento girante (BSF)	$f_b = 0,5 \cdot f_o \cdot \frac{D}{d} (1 - M^2)$
Frequência de passagem pela pista externa (BPFO)	$f_E = f_c \cdot N$
Frequência de passagem pela pista interna (BPFI)	$f_I = (f_o - f_c) \cdot N$

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesse experimento, foi desenvolvido um sistema mecânico para conduzir os ensaios. Esse sistema está localizado no Laboratório de Vibrações e Acústica da Faculdade de Engenharia Mecânica na cidade de Tucuruí, no estado do Pará. O sistema é composto por um motor elétrico modelo W22 Motofreio IR3 de 2 CV, fabricado pela WEG, conectado diretamente a um eixo através de um acoplamento de mandíbula, sem redução (relação 1:1). Após essa conexão, o eixo passa por um mancal que contém um rolamento rígido de esferas modelo 6202. Esse mancal é o ponto de fixação do acelerômetro, que fornece os sinais de vibração. O motor elétrico é controlado por um inversor de frequência modelo CFW08, também fabricado pela WEG. A Figura 3 apresenta o sistema.

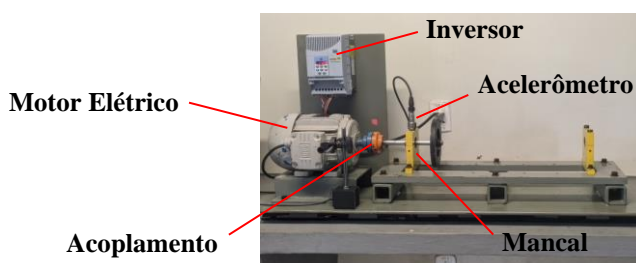


Figura 3. Sistema mecânico para análise de vibração (Autor)

A instrumentação e os rolamentos usados nos ensaios são descritos abaixo:

- **Acelerômetro**

Para capturar os sinais de vibração, foi utilizado o acelerômetro da TEKNIKAO com sensibilidade nominal de 100 mV/g, conforme mostrado na Fig. 4.



Figura 4. Acelerômetro modelo NK30 (Teknikao.com, 2022)

- **Analisador de frequências**

Para análise dos sinais de vibração, utilizou-se um coletor e analisador de vibrações que possui 2 canais de entrada para acelerômetros e comunicação USB para conexão a um PC ou notebook, conforme ilustrado na Fig. 5.



Figura 5. Coletor e analisador de vibrações modelo NK820 (Teknikao.com, 2022)

- **Rolamentos**

O rolamento estudado é o rolamento rígido de esferas modelo 6202 da marca SKF. Suas características são apresentadas na Fig. 6.

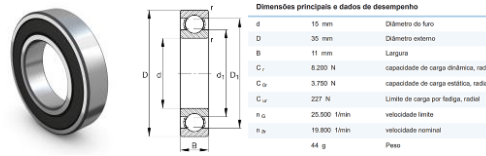


Figura 6. Rolamento modelo 6202 e suas características (SKF.com, 2022)

Para a realização dos ensaios, foram utilizados dois rolamentos, um com defeito severo na pista interna e externa e outro sem defeito. O defeito severo foi introduzido por meio de uma pequena remoção de material na superfície do rolamento, utilizando uma mini retífica. Essa remoção de material causou deformações permanentes e gerou um defeito irregular detectável pelos sinais de vibração.

Foram realizados ensaios para aquisição de sinais de vibração em nove rotações diferentes. Iniciou-se na rotação nominal de um motor de 2 pares de polos (3600 rpm), seguido pela redução da rotação nominal de motores típicos de 4, 6 e 8 pares de polos (1800 rpm, 1200 rpm e 900 rpm, respectivamente). Em seguida, a rotação foi reduzida em 100 rpm a cada medição, prosseguindo até 400 rpm, totalizando cinco rotações adicionais: 800 rpm, 700 rpm, 600 rpm, 500 rpm e 400 rpm.

Foram feitas quatro medições para cada rotação, sendo duas para o rolamento em bom estado e duas para o rolamento com defeito. Cada medição contou com 8192 pontos de aquisição, com frequência aquisição de 0,1 a 2000 Hz e período de aquisição de 1,6382 ms. O objetivo foi avaliar a efetividade das técnicas tradicionais no domínio do tempo e da frequência na detecção de sinais de vibração gerados pelos rolamentos, buscando identificar a eficiência dessas técnicas na detecção de falhas para baixos valores de rotações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados das Técnicas no Domínio do Tempo

Para uma avaliação completa das características vibratórias do motor em diferentes rotações, optou-se por capturar as medições dos sinais em mm/s (velocidade), já que esse parâmetro abrange uma faixa maior de frequências, permitindo uma análise mais abrangente do comportamento vibratório do motor, o que contribui para maior precisão nas medições, contribuindo para resultados mais confiáveis. Os resultados obtidos foram apresentados nas Figs. 7 a 11.

- **Valor Médio Quadrado (RMS)**

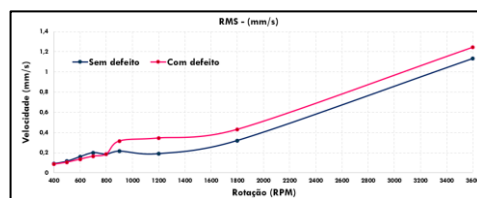


Figura 7. Níveis RMS em função da rotação (Autor)

Com base nos resultados obtidos para os valores de RMS, foi possível identificar sinais de vibração com defeitos em rotações de até 900 rpm.

- **Valor de Pico**

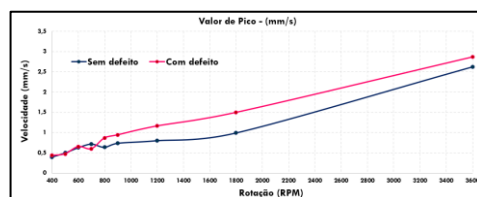


Figura 8. Valores de pico em função da rotação (Autor)

Observou-se que o Valor de Pico foi relativamente mais efetivo do que o valor de RMS na detecção de sinais de falha no rolamento. Foi possível identificar sinais de defeitos até a rotação de 800 rpm.

- **Fator de Crista**

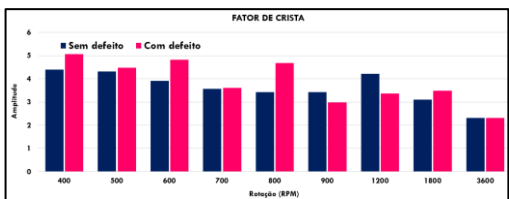


Figura 9. Fator de crista função da rotação (Autor)

Verificou-se que o Fator de Crista não se mostrou uma métrica eficaz para identificar sinais de vibração defeituosos, uma vez que sua capacidade de detecção se limitou a rotações de até 1800 rpm.

- **Fator K**

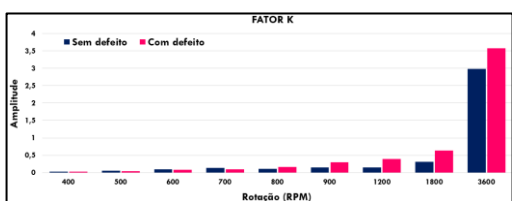


Figura 10. Fator K em função da rotação (Autor)

O Fator K foi capaz de detectar falhas no rolamento até a rotação de 800 rpm, indicando que é uma técnica razoável para identificar sinais defeituosos.

- **Fator de Curtose**

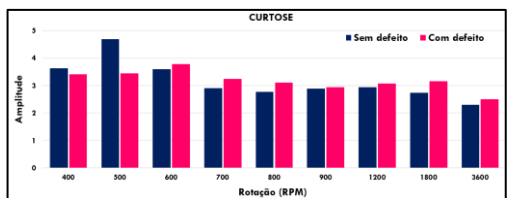


Figura 11. Fator de curtose em função da rotação (Autor)

A técnica de Fator de Curtose apresentou os melhores resultados, detectando sinais defeituosos até 600 rpm. Esse resultado era esperado, pois um valor de curtose acima de 3 indica uma possível falha iminente, de acordo com (MESQUITA et al, 2002). (BARILLI, 2013) afirma que esse valor diminui conforme o defeito se agrava.

4.2. Resultados no Domínio da Frequência

- **Determinando as frequências características das falhas nos elementos do rolamento**

Calculando e definindo as frequências características dos elementos do rolamento, utilizando as expressões disponibilizadas na Tab. 1, chega-se nas seguintes frequências características:

Tabela 2. Frequências características dos elementos do rolamento em estudo em função da rotação.

Rotação (RPM)	Frequências Fundamentais Nos Rolamentos (Hz)			
	f_c	f_b	f_E	f_I
3600	22,86	118,86	182,86	297,14
1800	11,43	59,43	91,43	148,57
1200	7,62	39,62	60,95	99,05
900	5,71	29,71	45,71	74,29
800	5,08	26,41	40,63	66,03
700	4,44	23,11	35,56	57,78
600	3,81	19,81	30,48	49,52
500	3,17	16,51	25,40	41,27
400	2,54	13,21	20,32	33,02

• Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Envelope

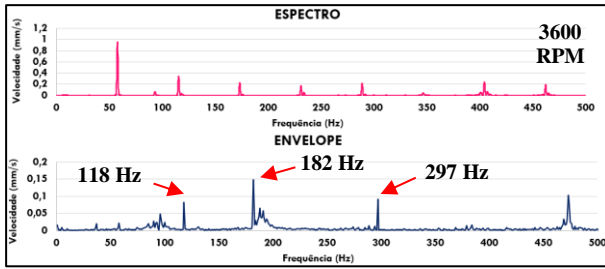


Figura 12. Espectro e seu envelope em 3600 Rpm.

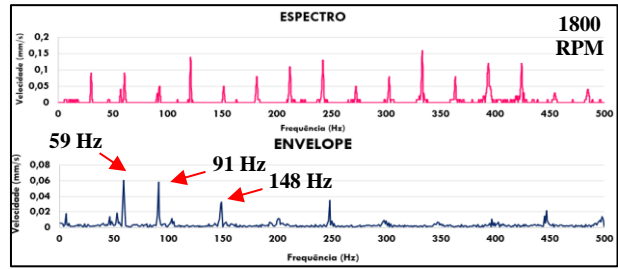


Figura 13. Espectro e seu envelope em 1800 Rpm (Autor)

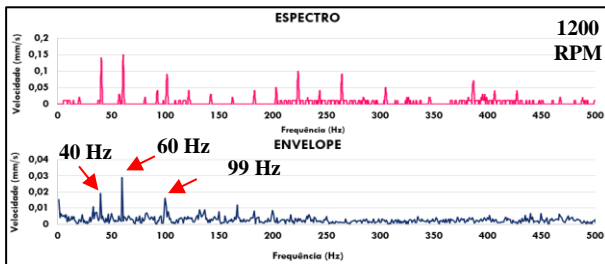


Figura 14. Espectro e seu envelope em 1200 Rpm.

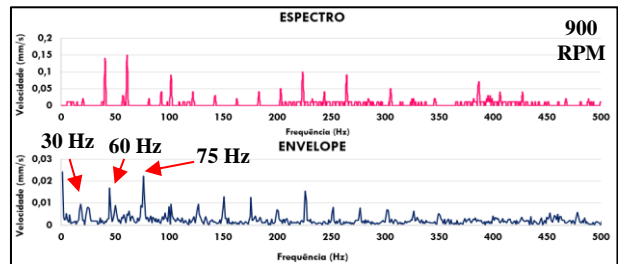


Figura 15. Espectro e seu envelope em 900 Rpm (Autor)

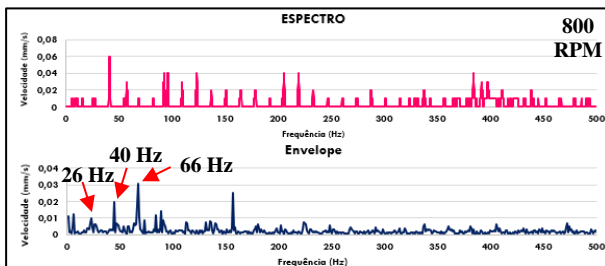


Figura 16. Espectro e seu envelope em 800 Rpm.

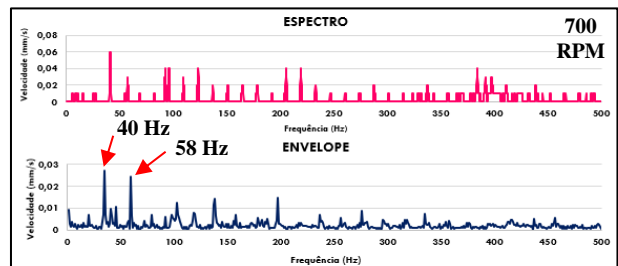


Figura 17. Espectro e seu envelope em 700 Rpm (Autor)

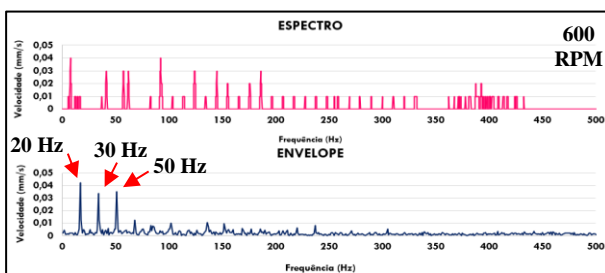


Figura 18. Espectro e seu envelope em 600 Rpm.

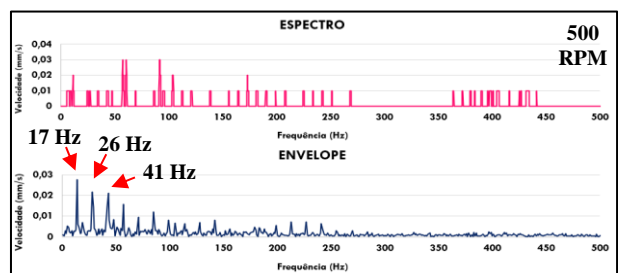


Figura 19. Espectro e seu envelope em 500 Rpm (Autor)

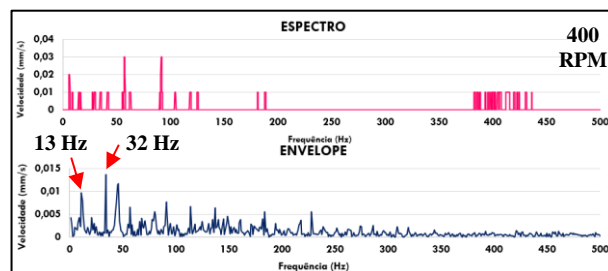


Figura 20. Espectro e seu envelope em 400 Rpm (Autor)

4.3. Análise Comparativa

Em primeira análise, as técnicas tradicionais no domínio do tempo obtiveram resultados relativamente bons, como demonstrado nas Figs. 7 a 11. No entanto, foi observado que o Valor Médio Quadrático (RMS) e o Valor de Pico limitaram sua eficácia a rotação de 900 rpm. Além disso, o Fator K e o Fator de Crista não apresentaram resultados satisfatórios, uma vez que essas técnicas são diretamente dependentes dos valores de RMS e do Valor de Pico, conforme mostrado nas Eq. (1) e Eq. (2). A métrica que melhor classificou os sinais de vibrações com defeitos no domínio do tempo foi o Fator de Curtose. Isso é interessante, pois essa técnica conseguiu identificar picos fora do padrão no sinal de vibração, bem como algumas partes transientes do defeito. Dessa forma, essa métrica mostrou-se eficiente para detecção de falhas em rolamentos. Vale ressaltar que essa técnica foi capaz de identificar um sinal defeituoso até a rotação de 600 rpm.

Em segunda análise, as técnicas no domínio da frequência obtiveram um melhor desempenho em comparação com as técnicas no domínio do tempo. A Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a técnica de Envelope para identificar as frequências características de falhas em rolamentos apresentaram resultados satisfatórios, como pode ser observado nas Figs. 12 a 20. A técnica de Envelope se mostrou especialmente poderosa no domínio da frequência, sendo capaz de identificar as frequências características mesmo em rotações mais baixas, como 400 rpm, permitindo determinar e classificar as falhas em uma ampla faixa de rotação.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentada uma breve revisão dos principais métodos tradicionais de detecção de falhas em mancais de rolamentos. Foram apresentadas as técnicas, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Em seguida, essas técnicas foram aplicadas para identificar falhas em rolamentos em diferentes valores de rotação, a fim de analisar a precisão de cada técnica para baixos valores de rotação.

Os resultados obtidos neste trabalho foram satisfatórios e permitiram verificar quais técnicas possuem melhor eficiência em função da rotação de trabalho. Foi observado que o Fator de Curtose foi a métrica que alcançou a maior faixa de rotações no domínio do tempo, enquanto a técnica do Envelope se mostrou a melhor no domínio da frequência, identificando as frequências características de falhas em todas as rotações analisadas neste estudo.

Em resumo, este estudo proporcionou uma avaliação comparativa das principais técnicas utilizadas para identificação de falhas em rolamentos, considerando diferentes faixas de rotação. Os resultados obtidos contribuem para aprimorar a detecção de falhas em rolamentos e podem ser úteis na implementação de estratégias de manutenção preditiva em sistemas industriais.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Dynamox pelo apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- Antoniolli, E. B., 1999. *Estudo comparativo de técnicas de medição e análise de vibrações para a manutenção preditiva em mancais de rolamento*. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Bezerra, R. A., 2004. "Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração". Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Lin, T. R., Yu, K. & Tan, J., 2017. "Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Roller Element Bearing". Doctoral Thesis, School of Mechanical Engineering, Qingdao University of Technology, Huangdao District, Qingdao, PR China.
- Kan, M. S., 2017. *Multi-sensor condition monitoring of bearings using support vector machines*. Tese de Doutorado, Queensland University of Technology, Australia.
- Macêdo, J. A. G. d. 2015., *Planejamento e controle da manutenção preventiva como meios para diminuir a manutenção corretiva*. TCC, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.
- Mcfadden, P. D. And Smith, J. D., 1984. "Model for the vibration produced by single point defect in a rolling element bearing". *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 96(1), p. 69-81.
- Mesquita, A.L.A., Santiago, D.F.A., Bezerra, R.A., Miranda, U.A., Dias, M. E Pederiva, R., 2002. "Detecção de falhas em rolamentos usando transformadas tempo-frequência: Comparação com análise de envelope". *Mecânica Computational*, Vol. XXI, p. 1938-1954, Santa Fé, Argentina.
- Ponci, L. P., & Cunha, P. M. R., 2004. "Previsão de falha em rolamentos por análise espectral e de envelope". *Teknikao*, Vol. 54(1), p. 1-11.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.