

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DIDÁTICO DE AVALIAÇÃO DE FALHAS EM MANCAIS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE SINAIS DE VIBRAÇÃO

R. H. OLIVEIRA FILHO*, P. A. C. CALDEIRA, I. J. C. NUÑEZ, F. A. LARA-MOLINA, T. A. GUIMARÃES

Universidade Federal do Triângulo Mineiro

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6077-9410>*

rhofilho@gmail.com*

Submetido 16/01/2024 - Aceito 14/11/2025

DOI: 10.15628/holos.2025.16700

RESUMO

As máquinas são compostas por diversos componentes, destacando-se os rolamentos, os quais, quando apresentam defeito, causam desde mau funcionamento até danos às máquinas e paradas no processo produtivo. A fim de monitorar o estado dos rolamentos, utiliza-se a manutenção preditiva, podendo ser ela através da análise do sinal de vibração dos rolamentos. Diversas técnicas podem ser utilizadas para análise de vibrações, destacando-se a análise espectral associada à técnica do envelope. Buscando elucidar as informações já existentes

para fins didáticos, neste trabalho foi realizada a simulação dos sinais de funcionamento de um sistema rotativo e de falhas em um rolamento e então aplicada a técnica do envelope para identificar estas falhas. Em um segundo momento, foram induzidos defeitos em rolamentos e realizados testes reais utilizando uma bancada didática desenvolvida para esse propósito, com a aquisição dos sinais de vibração e aplicação da técnica do envelope para identificação e mensuração dos defeitos.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de vibrações; Falhas em rolamentos; Técnica do envelope; Bancada didática.

DEVELOPMENT OF A DIDACTIC MODULE FOR EVALUATING BEARINGS USING VIBRATION SIGNS ANALYSIS

ABSTRACT

Motors are composed of several components, particularly bearings, which when defective, cause malfunctions that damage motors and cause downtime in the production process. In order to monitor the condition of the bearings, predictive maintenance is used, which may be through the analysis of the vibration signal of the bearings. Several techniques can be used for vibration analysis, highlighting the spectral analysis associated with the envelope technique. In order to

elucidate existing information for didactic purposes, this work simulated the operating signals of a rotating system and faults in a bearing and then applied the envelope technique to identify these faults. In a second step, defects were induced in bearings, and experimental tests were conducted using a didactic bench developed for this purpose, with the acquisition of vibration signals and application of the envelope technique to identify and measure defects.

KEYWORDS: Vibration analysis; Bearing failures; Envelope technique; Didactic bench

1 INTRODUÇÃO

Em razão do forte crescimento das indústrias e da elevada disputa de mercado, o aumento da produção tem se tornado cada vez mais intenso e necessário, o que gera uma preocupação das empresas em relação ao desempenho dos equipamentos envolvidos nos processos produtivos. O elevado acréscimo na produção faz com que as máquinas e equipamentos operem cada vez mais próximos dos valores limites de projeto, aumentando a frequência da necessidade de realizar a troca de peças e materiais, ou seja, tem-se o consequente aumento na necessidade de aplicação de técnicas de manutenção, visando a elevação da vida útil desses maquinários.

Em se tratando de manutenção para indústrias que possuem uma alta taxa de produção, destaca-se a técnica de manutenção preditiva, que possibilita ao usuário identificar os modos da falha antes que ela ocorra. Segundo Nascif e Kardec (2009), manutenção preditiva é descrita como a atualização realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática, e através das técnicas preditivas é feito o monitoramento da condição. Já a ação de correção, quando necessária, é realizada através de uma manutenção corretiva planejada.

Os mancais de rolamento são elementos de máquinas presentes em diversos equipamentos rotativos, utilizados nos mais diferentes setores da indústria. Devido à sua ampla utilização, tem gerado uma elevada preocupação com relação ao monitoramento destes elementos, pois caso o mesmo venha a falhar, as máquinas, muitas das vezes, se tornam inutilizáveis, o que pode resultar em perdas catastróficas para a empresa.

Assim, é constante a busca por diversas técnicas que utilizam a análise de vibrações para identificar os defeitos em mancais de rolamento da forma mais eficiente possível. Seguindo esta linha de raciocínio, no presente trabalho, inicialmente, foram simulados sinais de vibração provenientes de sistemas rotativos com falhas em rolamentos e, então, aplicadas técnicas de análise de sinais para identificação dos defeitos.

Nesse sentido, neste trabalho foram utilizados os modelos matemáticos de um sistema rotativo com defeitos em mancais de rolamento e utilizadas as técnicas de análise de sinais de vibração para identificação das falhas. Posteriormente, com a experiência adquirida, foi desenvolvido um módulo para uma bancada didática para a realização de testes reais que possibilitaram a identificação de falhas induzidas em um rolamento.

2 METODOLOGIA

No presente trabalho foi desenvolvido um módulo didático para análise de sinais de vibração em rolamentos com o intuito de mostrar e identificar diferentes tipos de falhas.

Inicialmente, o estudo foi desenvolvido de forma teórica, simulando os sinais de rotação de um sistema com defeitos em um mancal de rolamento e a aplicação da técnica do envelope para identificar as frequências características dessas falhas. Posteriormente, foi desenvolvido o módulo didático para validação experimental da técnica simulada através da indução de defeitos em um rolamento.

Os sinais de vibração foram coletados utilizando acelerômetros e uma placa de aquisição, sendo, em seguida, analisados utilizando a técnica do envelope. Essa abordagem possibilitou a comparação entre os resultados obtidos, garantindo maior precisão na análise das falhas.

2.1 Análise de sinais

Segundo Budynas e Nisbett (2011) os mancais de rolamento são a classe de mancal em que a carga principal é aplicada através de elementos rolantes. Estes são produzidos para suportar cargas radiais puras, cargas de empuxo ou uma combinação dos dois tipos de cargas.

Conforme Nepomuceno (1989), as principais falhas que ocorrem em mancais de rolamento são decorrentes de lubrificação inadequada, montagem incorreta, retentores inadequados, desalinhamento, passagem de corrente elétrica, vibrações externas, defeitos de fabricação e fadiga.

De acordo com Bezerra (2004), o contato entre a superfície defeituosa e outra superfície não defeituosa do rolamento produz um choque, gerando um impulso que excita ressonâncias no rolamento e na máquina. esses impulsos ocorrem periodicamente e em frequência determinada, unicamente, pela localização do defeito, podendo ser ele na pista interna, externa ou no elemento girante.

Na Figura 01 estão indicadas as dimensões do rolamento utilizadas para calcular as frequências características de seus elementos. Também são mostrados o ângulo de contato e as frequências características típicas. Pode se observar o diâmetro da esfera (d), o diâmetro primitivo (D), o diâmetro de pista interna (d_{pi}), o diâmetro da pista externa (d_{pe}), o ângulo de contato (β) e o número de esferas (N_e).

Para o caso em que a pista externa permanece estacionária ($f_{pe} = 0$) e a frequência de rotação é a da pista interna f_{pi} , as frequências típicas do rolamento são calculadas pelas Equações (01) a (04) (BARILLI, 2013).

A Equação (01) representa a frequência característica da gaiola do rolamento.

$$f_g = \frac{f_{pi}}{2} \left(1 - \frac{d \cos \beta}{D} \right) \quad (01)$$

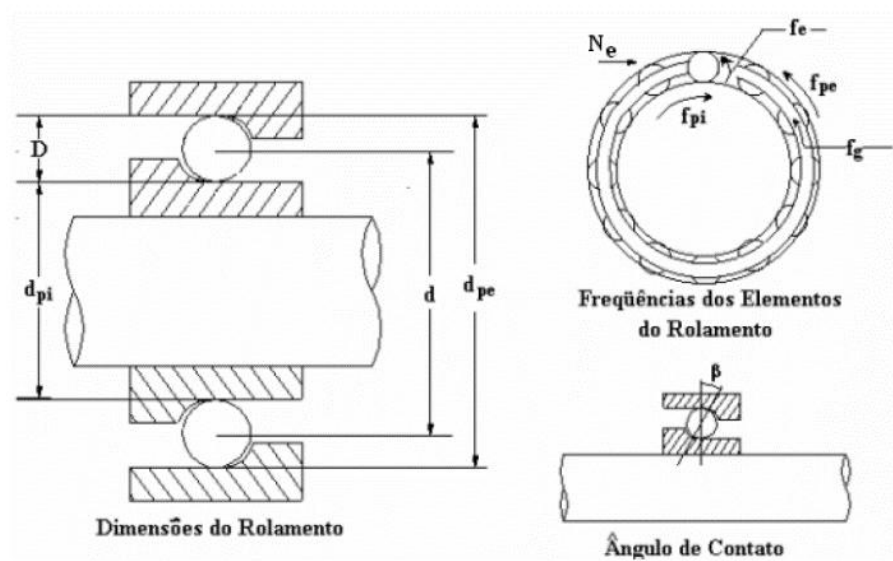


Figura 1: Frequências, dimensões e ângulo de contato de um rolamento.

Fonte: Meola, 2006.

A frequência característica da pista interna do rolamento pode ser determinada pela Equação (02).

$$f_{dpi} = \frac{N_e \cdot f_{pi}}{2} \left(1 + \frac{d \cdot \cos \beta}{D} \right) \quad (02)$$

A Equação (03) representa a frequência característica da pista externa do rolamento.

$$f_{dpe} = \frac{N_e \cdot f_{pi}}{2} \left(1 - \frac{d \cdot \cos \beta}{D} \right) \quad (03)$$

A frequência característica da esfera do rolamento pode ser determinada pela Equação (04).

$$f_{de} = \frac{D \cdot f_{pi}}{2 \cdot d} \left(1 - \frac{d^2 \cdot \cos^2 \beta}{D^2} \right) \quad (04)$$

Segundo Duarte (1998), a maioria das máquinas e equipamentos existentes executam movimentos com ciclo limitado, sendo alternativos ou rotativos. Com isso, o espectro de frequência das grandezas vibratórias destas máquinas e equipamentos é caracterizado por um ruído de banda larga somado a componentes discretos de amplitudes significativas, cujas

frequências estão intimamente relacionadas com a cinemática do movimento de cada parte dos mecanismos ou com as frequências naturais do sistema.

Portanto, conhecendo as frequências com que os principais elementos de máquinas geram vibrações forçadas, devido à alternância de movimentos, é possível identificar, via análise de espectro de frequência, o órgão da máquina que está com problemas.

2.2 Análise espectral

Fourier demonstrou que qualquer função periódica pode ser representada por uma série de senos e cossenos dadas pela Equação (05), na qual A_0 é o nível médio do sinal, A_i e B_i são os coeficientes de Fourier, T é o período e t é o vetor de tempo. Os termos A_i e B_i da série podem ser calculados pelas Equações (06) e (07), respectivamente (MEOLA, 2006).

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot i}{T} t\right) + \sum_{i=1}^{\infty} B_i \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi \cdot i}{T} t\right) \quad (05)$$

$$A_i = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot i}{T} t\right) dt \quad (06)$$

$$B_i = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi \cdot i}{T} t\right) dt \quad (07)$$

Utilizando a notação fatorial, os termos da série de Fourier podem ser representados pela Equação (08).

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} C_i \cdot e^{j\left(\frac{2\pi \cdot i}{T} t + \phi_i\right)} \quad (08)$$

$$\text{onde: } C_i = \sqrt{(A_i)^2 + (B_i)^2}; \phi_i = \text{tg}^{-1}\left(\frac{B_i}{A_i}\right); j = \sqrt{-1}$$

A representação das componentes C_i do sinal de aceleração pode ser vista na Figura 02. Este tipo de gráfico recebe o nome de espectro em frequência e a análise dos mesmos recebe o nome de análise espectral (MEOLA, 2006).

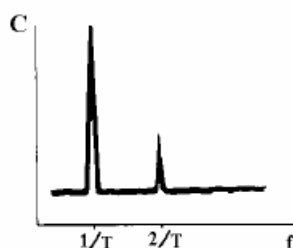


Figura 02: Representação das componentes C_i do sinal de aceleração.

Fonte: Meola, 2006.

Nos casos em que o sinal não é periódico, basta considerar que o mesmo pode ser tratado como um sinal em que o período T tende para infinito. Neste caso, a frequência fundamental $1/T$ tende para zero e o espectro em frequência, que é discreto para sinais periódicos num intervalo finito, torna-se contínuo, sendo a série substituída pela integral de Fourier (MEOLA, 2006).

2.3 Método do envelope

Büchner (2001) declara que, quando se efetua uma medição em uma máquina, geralmente, vários de seus componentes ou vizinhos podem estar gerando ruídos ao mesmo tempo, que em baixas frequências, apresentam um grande conteúdo de energia e acabam encobrindo o sinal de falha do rolamento no estágio inicial, tornando-se praticamente impossível realizar um diagnóstico do espectro direto. A este fenômeno dá-se o nome de mascaramento, o qual se trata de uma baixa relação entre o sinal e o ruído. Sendo assim, utiliza-se a técnica do envelope para solucionar casos como este.

Folgas excessivas e falhas iniciais em componentes de máquinas produzem uma série de impactos que são equivalentes à uma excitação do tipo impulsiva, a qual atua sobre a estrutura, ou seja, a máquina é excitada em suas frequências naturais. Matematicamente, diz-se que a frequência de excitação é modulada pelas frequências naturais da máquina. Como estes impactos são, em geral, de curta duração, contêm uma taxa muito alta de energia que é distribuída em todo o espectro de frequências. Uma vez que nas médias e baixas frequências o espectro de vibração das máquinas encontra-se repleto de componentes, o efeito desses impactos é melhor visualizado nas ressonâncias de frequências mais altas, em especial no caso de falhas em mancais de rolamentos, os quais têm rigidez muito elevada (MEOLA, 2006).

A técnica de envelope é um conceito aplicado para transmissão e recepção de dados. Nela, um sinal em alta frequência (portador) é utilizado para transportar o sinal de um ponto para outro. O sinal de interesse (modulador), é modulado pelo sinal portador. Assim, o processo de modulação

é definido como sendo um sinal de alta frequência modulando um outro de baixa frequência (RANDALL et. al., 2011).

Segundo Choudhury (1999), a análise por envelope, ou técnica de ressonância de alta frequência (HFRT), é utilizada para identificar defeitos através da extração de características das frequências de defeitos do sinal. No tratamento do sinal é utilizado um filtro passa banda, para eliminar sinais indesejados e, logo após, é filtrado e demodulado por um detector de envelope.

O processo de Demodulação nada mais é do que separar os dois sinais. O objetivo, portanto, é decodificar o sinal recebido encontrando o sinal modulador que, na verdade, é o próprio sinal do defeito. Na Figura 03 é ilustrado o exemplo do envelope de um sinal.

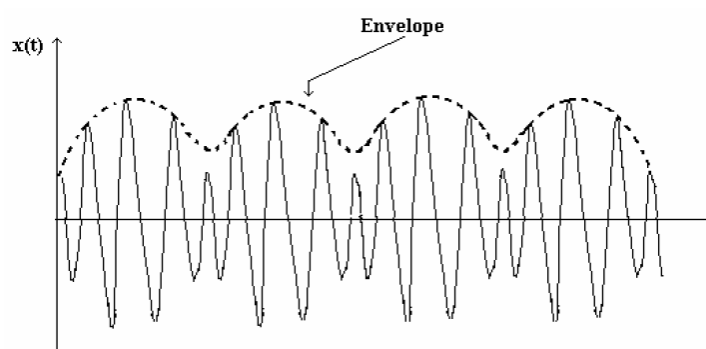


Figura 03: Envelope de um sinal para efeito de exemplo.

Fonte: Meola, 2006.

Segundo Brito (2012), a análise de Envelope é uma ferramenta que evidencia as repetições de um pulso em um dado intervalo de tempo. No estudo de falhas em rolamentos, a análise identifica a frequência gerada pelo pulso consequente da passagem repetitiva do elemento rolante sobre o defeito.

Para aplicação da técnica HFRT, faz-se necessária a seguinte ordem:

1. O sinal é adquirido no domínio do tempo;
2. Aplica-se a Transformada Rápida de Fourier no sinal, passando-o para o domínio da frequência. Com base neste espectro, verifica-se em qual frequência houve alteração significativa;
3. Realiza-se a filtragem do sinal, aplicando-se um filtro passa banda em torno da frequência de falha. Deve-se observar que o espectro da assinatura é necessário para a verificação de tal alteração;
4. Obtém-se o sinal analítico (Demodulação) via Transformada de Hilbert;
5. Por fim, aplica-se a FFT, para uma nova mudança de domínio para possibilitar a extração das frequências características de falha do mancal.

2.4 Simulação do sistema rotativo

Na realização deste trabalho, utilizou-se um mancal MKP15-01, que possui um rolamento com diâmetro externo de 32 mm, diâmetro interno de 15 mm, 9 elementos rolantes de 4,8 mm de diâmetro e o ângulo de contato de 0°. A rotação escolhida para o trabalho foi de 1200 rpm (20 Hz).

Utilizando as Equações 01 a 04, foram estimadas as frequências características dos componentes do rolamento, mostradas na Tabela 01.

Tabela 01: Frequências características dos componentes do rolamento.

Componentes do Rolamento	Frequência [Hz]
Rotação do Eixo (FR)	20,0
Pista Interna (FPI)	108,4
Pista Externa (FPE)	71,6
Elementos Rolantes (FER)	47,0
Gaiola (FG)	8,0

Sabe-se que o sinal de um componente em rotação obedece a um comportamento senoidal, conforme mostrado na Equação (09).

$$y = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) \quad (09)$$

onde, A é a amplitude do sinal, f é a frequência em questão em Hz, t é o vetor de tempo e φ é a fase do sinal.

A Equação 09 foi utilizada para modelar os sinais da rotação do motor ($f = FR$), de possíveis componentes do sistema (nesse caso foi utilizado um ruído branco) e de todos os componentes do rolamento com suas frequências características (FPI , FPE , FER e FG).

Os sinais dos componentes do rolamento foram modulados pelo sinal de rotação para simular possíveis defeitos na pista interna, na pista externa, nos elementos rolantes e na gaiola. Em uma primeira etapa, cada falha foi simulada individualmente, possibilitando a verificação segura da técnica, para posteriormente todos serem associados em uma única simulação.

Foram adotados valores de amplitude iguais a 1,0 para os sinais dos componentes do rolamento e de rotação do motor e 0,5 para o ruído branco referente aos componentes do sistema. A fase em todos os casos foi considerada igual a zero.

Para exemplificar, o processo de simulação de um sinal de falha na pista interna será descrito.

Inicialmente são criados os sinais de rotação do motor (Eq. 10), de rotação de possíveis componentes do sistema (Eq. 11) e da pista interna (Eq. 12).

$$S_{mot} = A_{mot} \cdot \sin(2.\pi.FR.t + \varphi_{mot}) \quad (10)$$

$$S_{aleat} = A_{aleat} \cdot \text{ruído_branco} \quad (11)$$

$$S_{PI} = A_{PI} \cdot \sin(2.\pi.FPI.t + \varphi_{PI}) \quad (12)$$

onde: A_{mot} e φ_{mot} são a amplitude e fase do sinal do motor, A_{aleat} é a amplitude do sinal dos componentes do sistema, *ruído_branco* é um sinal aleatório que simula os componentes do sistema, A_{PI} e φ_{PI} são a amplitude e a fase do sinal da pista interna.

Os sinais de rotação do motor e dos componentes do sistema são associados, criando o sinal do sistema (Eq. 13) e o sinal da pista interna é modulado na frequência de rotação (Eq. 14).

$$S_{sist} = S_{mot} + S_{aleat} \quad (13)$$

$$S_{mod_PI} = A_{PI} \cdot \sin(2.\pi.FPI.t + \varphi_{PI}) \cdot A_{mod} \cdot \sin(2.\pi.FR.t + \varphi_{mod}) \quad (14)$$

onde: A_{mod} e φ_{mod} são a amplitude e fase da modulação do sinal da pista interna pelo sinal de rotação.

Por fim, o sinal do sistema é associado ao sinal modulado da pista interna (Eq. 15).

$$S_{sist_PI} = S_{sist} + S_{mod_PI} \quad (15)$$

2.5 Testes experimentais

Após a análise matemática, partiu-se para a execução de testes reais. Para tanto, utilizou-se a bancada didática de elementos de máquinas rotativas localizada no Laboratório de Vibrações, Acústica e Controle no campus ICTE 2 da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), composta por:

- Motor elétrico modelo W22 IR3 de 0,5 CV, 4 polos, trifásico 220V/380V;
- Painel com inversor de frequência, para o acionamento e controle de velocidade, modelo CFW300, 220V;

- Mancal de rolamento modelo KP15;
- Eixo de aço carbono 1020, diâmetro 9/16" (14,2875 mm);

Para aquisição dos sinais de vibração, leitura e modelagem dos dados foram utilizados:

- Acelerômetros ICP modelos PCB 352C33 e 352C22;
- Calibrador de acelerômetro PCB 394C06;
- Bases magnéticas para acelerômetro;
- Cabos BNC/UNF 10-32;
- Placa aquisição de dados de 4 canais NI 9234 e módulo USB cDAQ 9171;
- Notebook;
- Programa MATLAB® para aquisição e análise dos sinais de vibração.

A Figura 04 ilustra o sistema utilizado no trabalho.

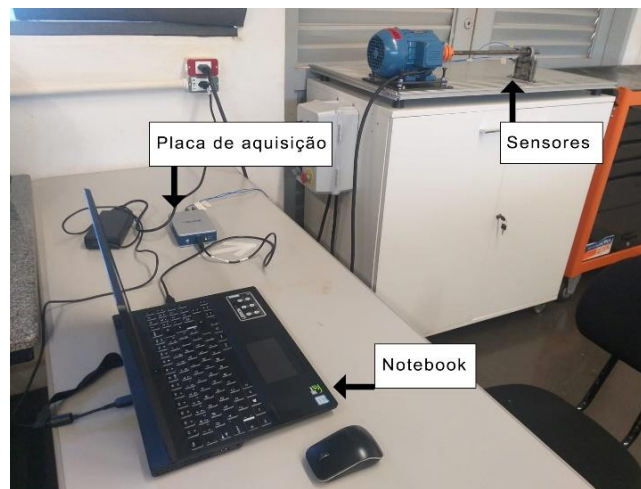


Figura 04: Bancada e instrumentação utilizados no trabalho.

Fonte: Do autor, 2022

Na figura 05 está demonstrado o posicionamento dos três acelerômetros aplicados ao teste.



Figura 05: Posicionamento dos acelerômetros no mancal de rolamento.

Fonte: Do autor, 2022

2.6 Aquisição de dados

Os sinais foram adquiridos com uma frequência de 2560 Hz, de acordo com Teorema da Amostragem de Nyquist-Shannon, o qual estabelece os critérios para prevenir distorções e sobreposições de frequências (Shannon, 1949). A rotação do motor foi controlada a 1200 RPM (20Hz), repetindo o padrão simulado. O tempo de aquisição de dados foi de 10 segundos por amostragem e resolução espectral de 0,1 Hz, no total, foram 10 medições por análise.

Os sinais adquiridos pelos acelerômetros (analógico) são então enviados a placa de aquisição de dados, a qual realiza a conversão analógico-digital (A/D), assim, ocorrendo a discretização do sinal em amostras discretas e de intervalos de tempo iguais. As amostras foram numeradas, de 1 a 10, e separados em uma pasta de controle, nomeadas com as correspondentes falhas analisadas.

2.7 Fluxograma da lógica de aquisição dos sinais

Nas modelagens dos sinais de falhas teórico e experimental foi implementado uma sistemática para aquisição dos sinais e identificação das frequências de falhas. Portanto, foi estruturado um fluxograma para descrição das etapas, demonstrada na figura 06.

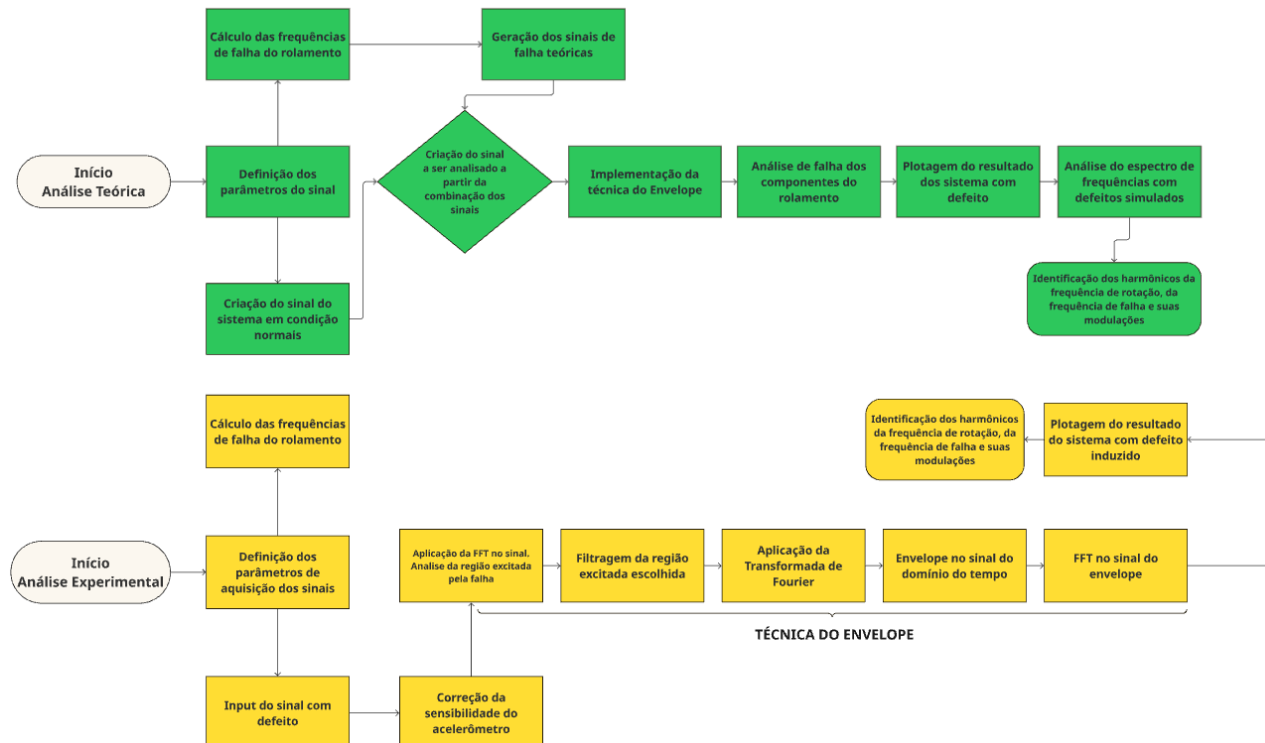


Figura 06: Fluxograma da lógica de aquisições dos sinais.

Fonte: Do autor, 2022

2.8 Introdução de defeitos no rolamento

Anteriormente, foram descritas as possíveis causas de defeitos nos rolamentos. O tipo de falha predominante é a danificação das pistas, através da geração de trinca por fadiga. Em razão da dificuldade de encontrar uma peça com os defeitos necessários para o estudo e a dureza elevada do material, os defeitos foram induzidos em um rolamento novo a partir de um corte utilizando uma esmerilhadeira. Esse processo teve como objetivo reproduzir, de forma experimental, as falhas nos componentes do rolamento.

O corte foi feito a partir do exterior do rolamento até uma profundidade que atingisse o interior da pista externa, na região de contato com as esferas. Em seguida a profundidade do corte foi aumentada, atingindo a gaiola e possivelmente os elementos rolantes. Na última etapa, o corte foi mais uma vez aprofundado, atingindo a pista interna.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, foi avaliado o modelo matemático para simulação de um sistema rotativo com defeitos em componentes de um rolamento.

Na Figura 07, pode-se observar o espectro de frequências do envelope de um sinal com simulação de defeito na pista interna, modelado conforme explicado nas Eqs. 10 a 15. Nota-se a presença de quatro picos:

- 1º harmônico da FR: 40 Hz;
- FPI: 108,4 Hz;
- Modulação de $FPI \pm 2 \times FR$: 68,4 Hz e 148,4 Hz;

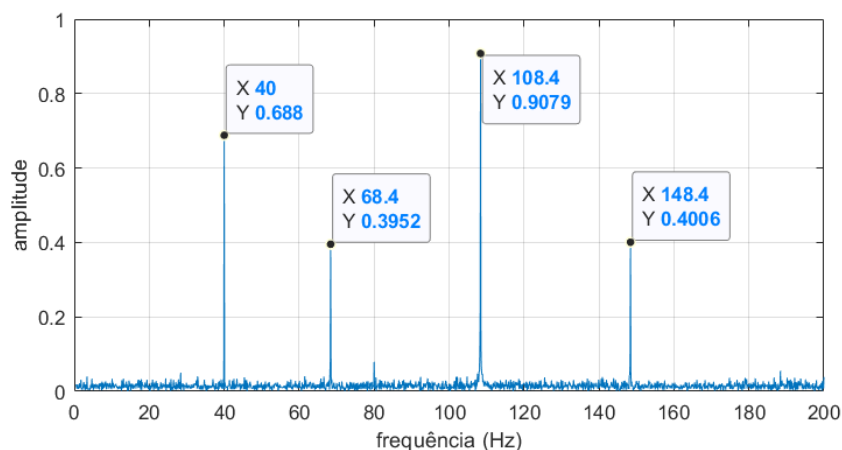


Figura 07: Espectro de frequências do envelope de um sinal com simulação de defeito na pista interna.

Na Figura 08, observa-se o espectro de frequências do envelope de um sinal com simulação de defeito na pista externa. Os quatro picos visualizados se referem a:

- 1º harmônico da FR: 40 Hz;
- FPE: 71,6 Hz;
- Modulação de FPE $\pm 2 \times$ FR: 31,64 Hz e 111,6 Hz.

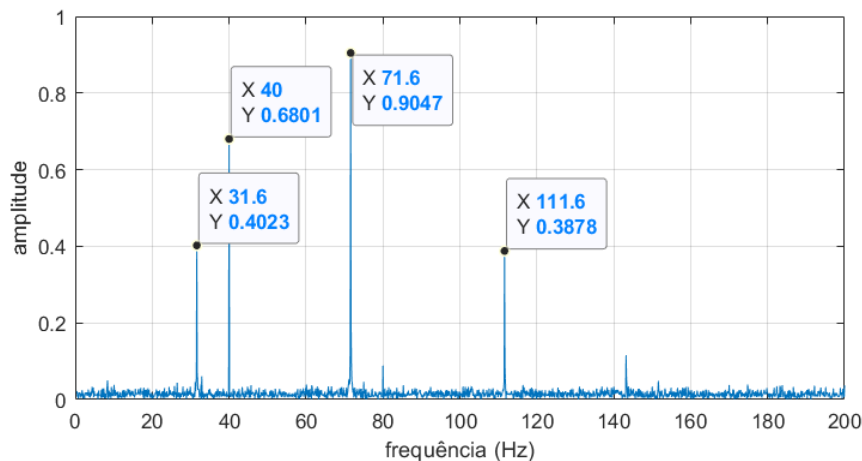


Figura 08: Espectro de frequências do envelope de um sinal com simulação de defeito na pista externa.

Na Figura 09, é possível observar o espectro de frequências do envelope de um sinal com simulação de defeito nos elementos rolantes. Os picos visualizados se referem a:

- 1º harmônico da FR: 40 Hz;
- FER: 46,9 Hz;
- Modulação de FRE $\pm 2 \times$ FR: 6,9 Hz e 86,9 Hz.

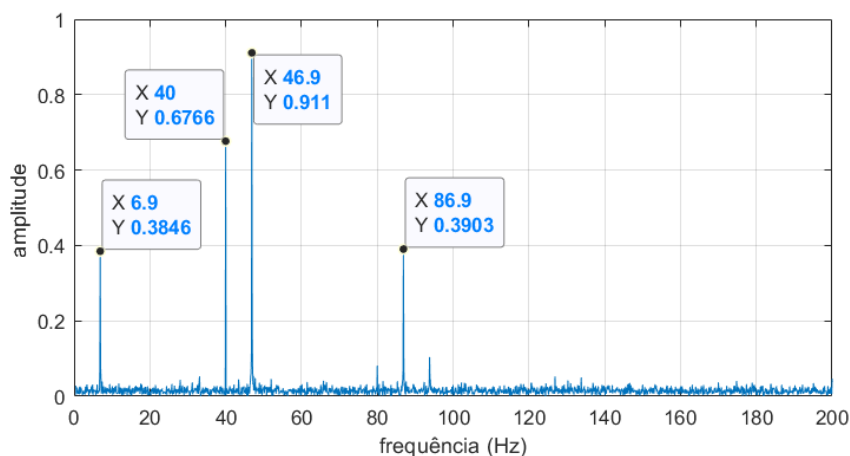


Figura 09: Espectro de frequências do envelope de um sinal com simulação de defeito nos elementos rolantes.

Na Figura 10, é mostrado o espectro de frequências do envelope de um sinal com simulação de defeito na gaiola. Nota-se a presença de quatro picos:

- 1º harmônico da FR: 40 Hz;
- FG: 8,0 Hz;
- Modulação de FG $\pm 2 \times$ FR: 32,0 Hz e 48,0 Hz.

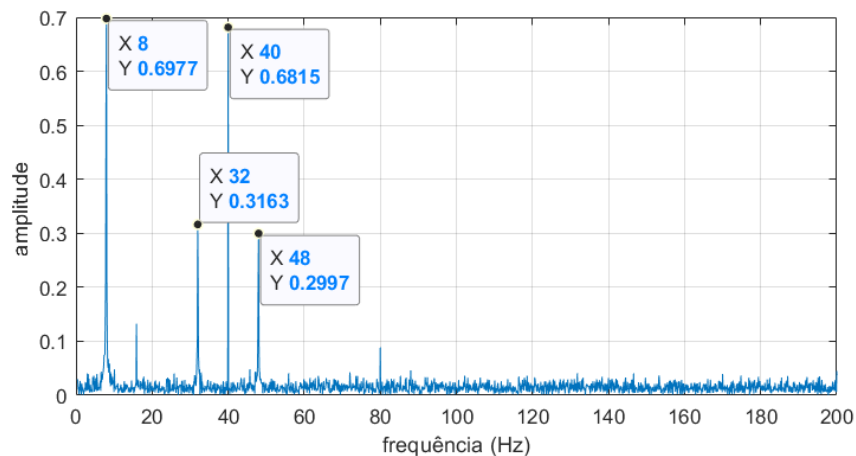


Figura 10: Espectro de frequências do envelope de um sinal com simulação de defeito na gaiola.

A Figura 11 traz o espectro de frequências do envelope de um sinal com simulação de rolamento que apresenta os quatro defeitos. Os picos destacados se referem a:

- FG: 8 Hz;
- 1º harmônico de FR: 40 Hz;
- FER: 46,9 Hz;
- FPE: 71,6 Hz;
- FPI: 108,4 Hz.

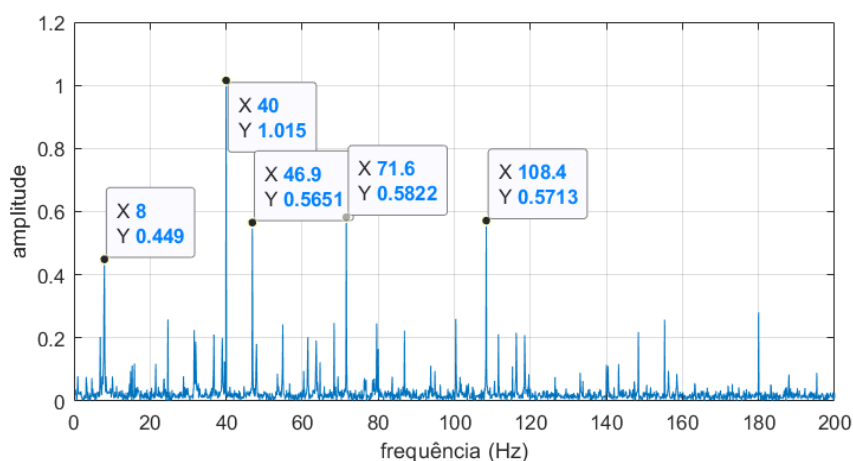


Figura 11: Espectro de frequências do envelope de um sinal com simulação de rolamento que apresenta os quatro defeitos.

Assim, após as simulações analíticas, iniciou-se os testes reais, utilizando-se a bancada e instrumentação descritas no item 2.5. Para tanto, foi induzido um defeito no rolamento, conforme mostrado no item 2.6.

É importante destacar que a frequência de rotação não se mantém estável durante um teste experimental e, no presente caso, ela sofreu flutuações em torno da frequência de 20 Hz. Por esse motivo, as frequências de interesse destacadas nas figuras a seguir podem variar um pouco.

Na Figura 12 é possível observar o espectro de frequências do envelope do sinal para o defeito induzido com menor profundidade do corte (para atingir a pista externa). Os picos visualizados se referem a:

- FR e seus 1º, 2º e 3º harmônicos: 20,6 Hz, 41,2 Hz, 61,8 Hz, 82,4 Hz;
- FPE: 73,3 Hz;
- Modulação de FPE \pm FR: 52,7 Hz e 93,9 Hz.

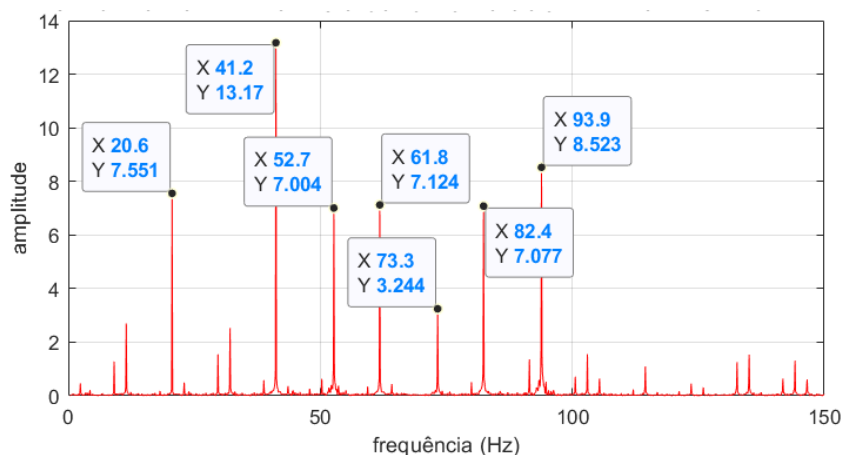


Figura 12: Espectro de frequências do envelope do sinal do rolamento com defeito induzido na pista externa.

Na Figura 13 é possível observar o espectro de frequências do envelope do sinal para o defeito induzido com maior profundidade do corte (para atingir a gaiola). Os picos visualizados se referem a:

- FR e seus 1º, 2º e 3º harmônicos: 20,6 Hz, 41,2 Hz, 61,8 Hz, 82,4 Hz;
- FG: 8,1 Hz;
- FPE: 72,8 Hz;
- Modulação de FPE \pm FR: 52,7 Hz e 93,9 Hz;
- Modulação de FPE \pm 2 x FR: 41,2 Hz e 114,1 Hz.

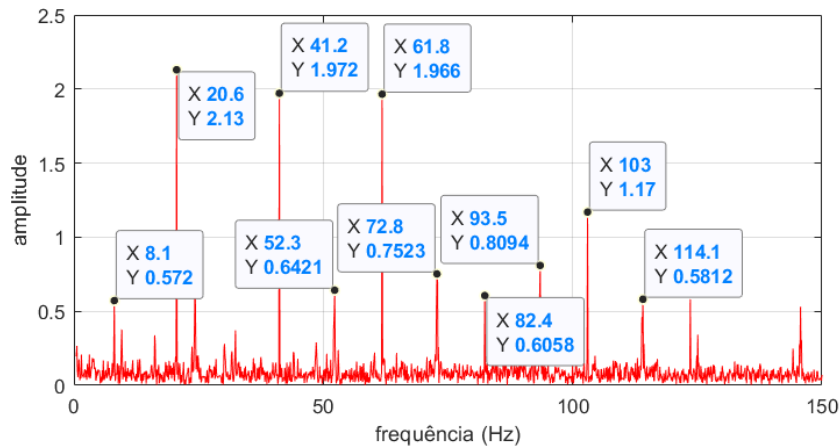


Figura 13: Espectro de frequências do envelope do sinal do rolamento com defeito induzido na pista externa e gaiola.

Existe um pico na frequência de 103,0 Hz, mas para concluir se tal frequência é induzida pela pista interna, o defeito foi agravado um pouco mais, para se ter a certeza de que o corte atingiu a pista interna.

Na Figura 14 é mostrado o espectro de frequências do envelope do sinal com a profundidade do corte aumentada, visando atingir a pista interna. Os picos visualizados se referem a:

- FR e seus 2º e 3º harmônicos: 20,6 Hz, 61,8 Hz, 82,5 Hz;
- FG: 9,0 Hz;
- FPE: 73,4 Hz;
- FPI: 103,1 Hz;
- Modulação de FPE \pm FR: 52,8 Hz e 94,1 Hz;
- Modulação de FPE \pm 2 x FR: 32,2 Hz e 114,7 Hz;
- Modulação de FPE \pm 3 x FR: 11,6 Hz e 135,3 Hz.
- Modulação de FG \pm FR: 11,6 Hz e 29,6 Hz;
- Modulação de FPI \pm FR: 82,5 Hz e 123,7 Hz.

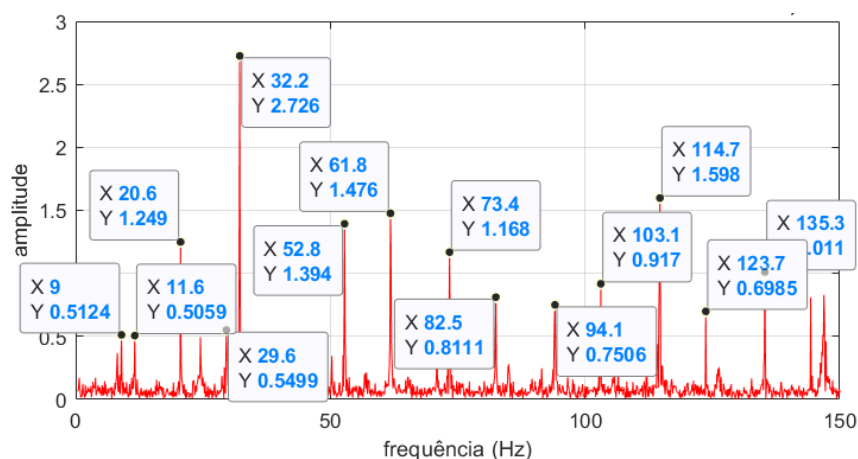


Figura 14: Espectro de frequências do envelope do sinal do rolamento com defeito induzido na pista externa, gaiola e pista interna.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como proposta o desenvolvimento de um módulo didático para aplicação de uma metodologia para identificar falhas em rolamentos utilizados em máquinas rotativas, com a finalidade de apresentar uma estratégia de manutenção preditiva. O método escolhido e estudado foi a análise espectral juntamente da técnica do envelope. Como resultado, a implementação da técnica destaca as frequências características de falha na pista externa, interna, elementos rolantes e gaiola, dentre as demais frequências do sistema.

A técnica do envelope foi aplicada inicialmente em um modelo matemático, a fim de conhecer as respectivas frequências dos tipos de falhas e compará-las com o sinal obtido experimentalmente.

A aplicação da técnica HFRT no modelo matemático e no sinal adquirido se mostrou eficaz na identificação dos defeitos de rolamento, enfatizando as frequências características dos componentes do rolamento e as modulações causadas pela frequência de rotação. O desenvolvimento e os resultados da análise experimental validam aplicação dos princípios descritos por Randall (2011).

A eficácia da técnica foi comprovada na identificação e mensuração dos defeitos aplicados ao rolamento, o que reforça a conclusão de que a análise espectral proveniente da técnica do envelope constitui uma das principais ferramentas na manutenção preditiva de máquinas rotativas das indústrias. Conforme destaca Choudhury (1999), embora eficaz, a metodologia apresenta limitações nos cenários de desgaste avançado dos elementos rolantes, uma vez que as frequências características de falha podem ser mascaradas pelo ruído de fundo gerado pelo próprio funcionamento da máquina.

O módulo didático demonstrou ser um meio prático e fundamental na aplicação prática e de ensino. O seu uso permite que estudantes e profissionais visualizem os conceitos teóricos

através de simulações controladas. Como sugestão de aprimoramento para futuras réplicas do módulo ou em trabalhos acadêmicos posteriores, recomenda-se:

- Simular os sinais de funcionamento de um sistema rotativo;
- Estimar as frequências características dos componentes;
- Modular os sinais dos componentes rotativos pelo sinal de rotação para simular os defeitos;
- Aplicar a técnica do envelope para identificar as falhas simuladas;
- Analisar o espectro de frequências do envelope dos sinais simulados;
- Desenvolver ou utilizar um módulo didático para análise de sinais de vibração em sistemas rotativos;
- A implementação do teste experimental em equipamentos operando em ambientes industriais reais possibilita a validação e o ajuste dos parâmetros de detecção, garantindo maior confiabilidade e precisão ao processo;

Dessa forma, conclui-se que a análise espectral aliada à técnica do envelope é uma importante ferramenta na manutenção preditiva de máquinas rotativas, sendo possível apresentá-las em uma aplicação prática utilizando a bancada didática apresentada no trabalho.

5 REFERÊNCIAS

- Barilli, R. (2013) *Análise de Falhas em Mancais de Rolamento Utilizando a Técnica do Envelope*. [Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro]. <https://oceanica.ufrj.br/>
- Bezerra, R., A. (2004). *Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração*. [Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas]. <https://www.unicamp.br/unicamp/>
- Brito, L. C, Pereira, J. G., Brito, J. N. (2012, 23 a 25 de outubro). *Associação das técnicas preditivas: análise de vibração e análise de graxa, para detecção de falhas em rolamento*. VII Congresso Bolivariano de Ingeniería Mecánica. Cusco. <https://docplayer.com.br/74423031-Vii-congreso-bolivariano-de-ingenieria-mecanica-cusco-23-al-25-de-octubre-del-2012.html>
- Büchner, P. C. (2001). *Análise de Mancais de Rolamentos através dos Sinais de Vibrações, Usando Método da Curtose e do Envelope*. [Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná]. <https://www.pucpr.br/>
- Budynas, R., & Nisbett, J. (2011) *Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica*. (8ª ed.). AMGH.
- Duarte, M. A. V. (1998). *Manutenção Preditiva via Monitoramento de Vibrações*. (1ª Ed.). Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <https://ufu.br/>
- Meola, T. (2006). *Monitoramento em tempo real da qualidade de sinais de vibrações utilizando inteligência artificial*. [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia].

<http://www.femec.ufu.br/pos-graduacao/programa-de-pos-graduacao-em-engenharia-mecanica>

Nascif, J., & Kardec, A. (2009). *Manutenção - Função Estratégica*. (3ª Ed.) Qualitymark.

Nepomuceno, L. X. (1989) *Técnicas de Manutenção Preditiva*. (Ed. Edgard Blucher - Vol.1).

Randall, R.B., & Antoni, J. (2011). Rolling element bearing diagnostic – A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), 485-520. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.017>

Tandon, N., & Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, 32 (8), 469–480. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00077-8)

Shannon, C. (1949) Communication in the Presence of Noise. Proceedings Of The Ire, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 37, n. 1, p. 10–21.

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Oliveira Filho, R. H. de, Costa Caldeira, P. A., Cárdenas Nuñez, I. J., Lara Molina, F. A., & Guimarães, T. A. Desenvolvimento de um módulo didático de avaliação de falhas em mancais através da análise de sinais de vibração. *HOLOS*, 4(41). <https://doi.org/10.15628/holos.2025.16700>

SOBRE OS AUTORES

R. H. OLIVEIRA FILHO

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia/UFU; Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro/UFTM (Brasil).

E-mail: rhofilho@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6077-9410>

P. A. C. CALDEIRA

Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

E-mail: pedrocostacaldeira@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-5376-9642>

I. J. C. NUÑEZ

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia/UFU com Estágio Doutoral no Politécnico de Milano (Itália); Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro/UFTM (Brasil).

E-mail: israel.nunez@uftm.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1217-6962>

F. A. LARA-MOLINA

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP; Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro/UFTM (Brasil)

E-mail: fabian.molina@uftm.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-2356>

T. A. GUIMARÃES

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia/UFU; Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro/UFTM (Brasil).

E-mail: tobias.guimaraes@uftm.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6350-7867>

Editora Responsável: Gustavo Fontoura Souza

Pareceristas *Ad Hoc*: José Adriano da Costa e José Soares Lopes



Recebido 16 de janeiro de 2024

Aceito: 14 de novembro de 2025

Publicado: 23 de dezembro de 2025