

## **DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DE ROLAMENTOS E VALIDAÇÃO POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

**José Dion Soares Júnior, djr.soares1105@gmail.com<sup>1</sup>**

**Vitória Eduarda de Souza Lira, vitududa43@gmail.com<sup>2</sup>**

**Roberto de Araújo Bezerra, roberto.bezerra@gmail.com<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Federal do Ceará, Campus Maracanaú – Bloco C – Maracanaú – CE.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici – Bloco 714 – Fortaleza – CE.

**Resumo.** Com o avanço das máquinas mecânicas e o aumento de sua complexidade, a realização de manutenções periódicas eficientes se torna cada vez mais necessária. O progresso na análise de sinais vibratórios tem possibilitado a detecção de falhas em diversos componentes de sistemas mecânicos, e os rolamentos se encaixam perfeitamente nesse contexto. Essenciais para o funcionamento adequado das máquinas, os rolamentos são amplamente utilizados, mas sua falha pode resultar em paradas inesperadas e custos elevados com manutenções corretivas. Nesse cenário, o uso de métodos experimentais se revela uma ferramenta crucial para o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento e diagnóstico precoce de falhas, permitindo a redução de custos, o aumento da confiabilidade dos equipamentos e a elaboração de cronogramas de manutenção mais assertivos. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma bancada de testes para simulação e validação do comportamento dinâmico de rolamentos sob diferentes condições de operação, utilizando a análise de vibração. Para alcançar esse objetivo, foi projetado e construído um sistema que simula o funcionamento de rolamentos, induzindo falhas e analisando seus comportamentos dinâmicos. Os resultados obtidos mostraram-se consistentes com a teoria, demonstrando que o projeto e a construção da bancada foram bem-sucedidos. Isso valida a eficácia da bancada para estudos e aplicação prática na detecção de falhas em rolamentos, destacando sua relevância para futuras pesquisas e aplicações industriais.

**Palavras-chave:** bancada de testes; rolamentos; análise de vibrações.

**Abstract.** With the advancement of mechanical machines and their increasing complexity, efficient periodic maintenance has become increasingly necessary. Advances in the analysis of vibration signals have made it possible to detect failures in various components of mechanical systems, and bearings fit perfectly into this context. Bearings are essential for the proper functioning of machines and are widely used, but their failure can result in unexpected shutdowns and high costs with corrective maintenance. In this scenario, the use of experimental methods has proven to be a crucial tool for the development of monitoring technologies and early diagnosis of failures, allowing for cost reduction, increased equipment reliability and the preparation of more assertive maintenance schedules. This work aims to develop a test bench for simulating and validating the dynamic behavior of bearings under different operating conditions, using vibration analysis. To achieve this goal, a system was designed and built to simulate the operation of bearings, inducing failures and analyzing their dynamic behavior. The results obtained were consistent with the theory, demonstrating that the design and construction of the bench were successful. This validates the effectiveness of the bench for studies and practical application in bearing failure detection, highlighting its relevance for future research and industrial applications.

**Keywords:** test bench; bearings; vibration analysis.

### **1. INTRODUÇÃO**

O avanço tecnológico da análise de sinais vibratórios permite a detecção de falhas em diferentes componentes de um sistema mecânico. A grande maioria das máquinas apresentam peças que necessitam de mancais de rolamentos, de forma a minimizar o atrito e aumentar a performance da máquina, sendo os componentes suscetíveis de falhas. A detecção das falhas incipientes dos componentes do rolamento é obtida através do uso das técnicas de manutenções preditivas. Os rolamentos são componentes críticos em diversos sistemas mecânicos e são amplamente utilizados em motores turbinas, carros, motos, e em máquinas industriais em geral.

Segundo Kardec (2001), “Manutenção Preditiva é a atuação realizada com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática”. Essa categoria de manutenção surge com

o intuito de monitorar os elementos de uma máquina e diagnosticar a falha antes que ela se agrave e cause danos ao equipamento. Dentre as técnicas mais utilizadas, temos análise de vibração, termografia, análise de óleo, análise de ruído, entre outras. A análise de vibração é uma abordagem bastante eficiente e amplamente aplicada, é uma metodologia que permite o diagnóstico de componentes com a análise dos padrões vibratórios emitidos pelo mesmo durante seu funcionamento.

Segundo Bezerra (2004), os rolamentos são responsáveis por paradas indesejadas quando suas falhas não são detectadas a tempo, isso pode elevar o custo de operação e trazer riscos à segurança do operador. Diante disso, o desenvolvimento de ferramentas e metodologias sobre esse elemento de máquina se torna imprescindível, proporcionando melhor diagnóstico dos modos de falhas do mesmo.

Assim, durante este trabalho foi projetada e confeccionada uma bancada de teste de rolamento que possibilitaram a análise experimental e detecção de falhas nos componentes do rolamento, através da análise de sinais vibratórios. Por meio deste projeto, espera-se contribuir para a formação de profissionais mais capacitados na área de manutenção preditiva, além de fomentar o desenvolvimento de tecnologias educacionais voltadas para a engenharia mecânica.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A NBR 5462 (1994) define manutenção, como a “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.” Dentre os tipos de manutenção mais conhecidos, temos: corretiva, preventiva e preditiva.

Petrobrás (2000), relata que com a utilização das técnicas de manutenção preditiva, é possível fornecer previsões de quebras e defeitos nas máquinas, reduzindo o risco de quebras inesperadas. Isso possibilita paradas planejadas, garantindo um melhor aproveitamento dos equipamentos e aumentando a eficiência da linha de produção. Todo corpo ou sistema possui modos únicos de vibração durante seu funcionamento, determinados por características físicas como massa, rigidez, amortecimento e condições operacionais. Geitner (1999) relata que o desgaste em uma máquina muitas vezes se manifesta justamente com mudanças nos padrões vibratórios.

Segundo MATOS (1980) apud ANTONIOLLI (1999), o programa de manutenção preditiva baseado no controle de vibração parte do princípio de que toda máquina vibra e que a intensidade dessa vibração aumenta conforme o defeito se agrava. Dessa forma, por meio de medições periódicas dos sinais vibratórios dos equipamentos e do registro desses dados, é possível monitorar a evolução de falhas e planejar estrategicamente a manutenção quando os valores atingirem limites pré-determinados. Essa abordagem oferece diversas vantagens em comparação com as técnicas convencionais de manutenção corretiva e preventiva.

“A análise de vibrações é a técnica utilizada na manutenção preditiva para a avaliação de máquinas rotativas que apresenta um melhor custo/benefício, em relação as demais técnicas, fornecendo dados que possibilitam prolongar a vida dos equipamentos, baseando-se nas informações obtidas durante a operação normal do mesmo” (Petrobrás, 2000).

### 2.1. Rolamentos

São geralmente utilizados em componentes que necessitem movimento relativo entre si, com o objetivo de redução de atrito e aumento de eficiência do sistema. Segundo a SKF (2012), cerca de 1/3 dos rolamentos falha por fadiga natural, 1/3 por falhas de lubrificação, 1/6 falha por contaminação dos lubrificantes e 1/6 restante falha por outros motivos, que incluem manuseio e montagem inadequados, contudo a falha depende do setor e da utilização do rolamento em questão. Em virtude disso, percebe-se que o cuidado com a montagem e desmontagem de rolamentos é um fator crucial para o seu correto funcionamento, e deve-se ter bastante atenção na montagem dos mesmos após uma manutenção que requer a substituição do rolamento.

Quando um rolamento apresenta defeito, seu espectro de vibração reflete as irregularidades geradas, permitindo a identificação e interpretação do problema. A frequência emitida depende da parte do rolamento que está defeituosa. Essa frequência característica varia conforme a localização da falha, que pode ocorrer na pista interna, pista externa, esfera ou gaiola. Além disso, também é influenciada pela geometria do rolamento e pela velocidade de rotação.

### 2.2. Análise de Vibrações

Segundo Lago (2007) “o princípio de análise das vibrações baseia-se na idéia de que as estruturas das máquinas excitadas pelos esforços dinâmicos (ação de forças) dão sinais vibratórios, cuja freqüência é igual à freqüência dos agentes excitadores”. Para o monitoramento de sinais vibratórios, são utilizados acelerômetros, são transdutores que transformam os pulsos vibratórios em sinais elétricos, que podem ser aquisitados e analisados posteriormente, é observado que após o transdutor, o sinal seguirá para o pré-amplificador, responsável por aumentar a escala dos sinais coletados pelo acelerômetro, logo após, os filtros são utilizados para coletar apenas uma parte útil do sinal, garantindo que não haja interferência de dados indesejáveis, como por exemplo vibrações decorrentes da ressonância do próprio transdutor. Após a filtragem do sinal na faixa desejada, o sinal é processado e pode ser visualizado na porta de saída, o esquema de medição pode ser observado na Fig. 1.

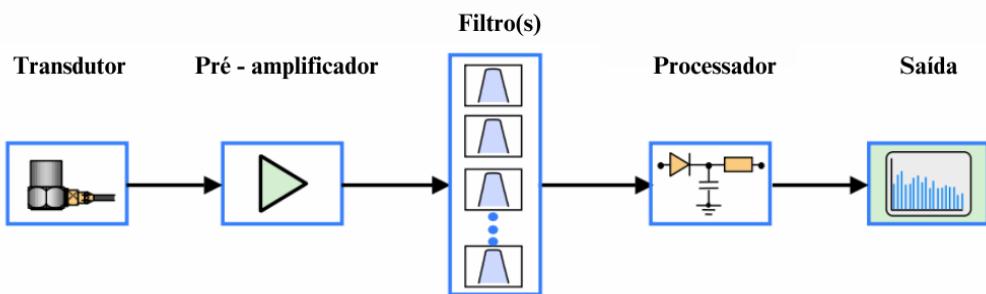


Figura 1. Esquema de medição (adaptado de BRÜEL & KJÆR, 1998)

Além disso, o sinal pode ser aquisitado em três parâmetros diferentes, são eles: Deslocamento, velocidade e aceleração. A divergência principal entre os mesmos é uma diferença de fases, e cada parâmetro possui função característica em função da frequência do sinal. Os sinais que serão aquisitados na bancada são de alta frequência e serão utilizados parâmetros de aceleração para sua aquisição, pois este parâmetro possui melhor resposta para sinais de alta frequência.

Nesse contexto, as falhas dos rolamentos também podem ser modeladas matematicamente, Bezerra (2004) apresenta gráficos modelos teóricos para as falhas em rolamento, a Fig. 2, apresenta os modelos de sinais sem ruído modelados para uma rotação de 45 Hz.

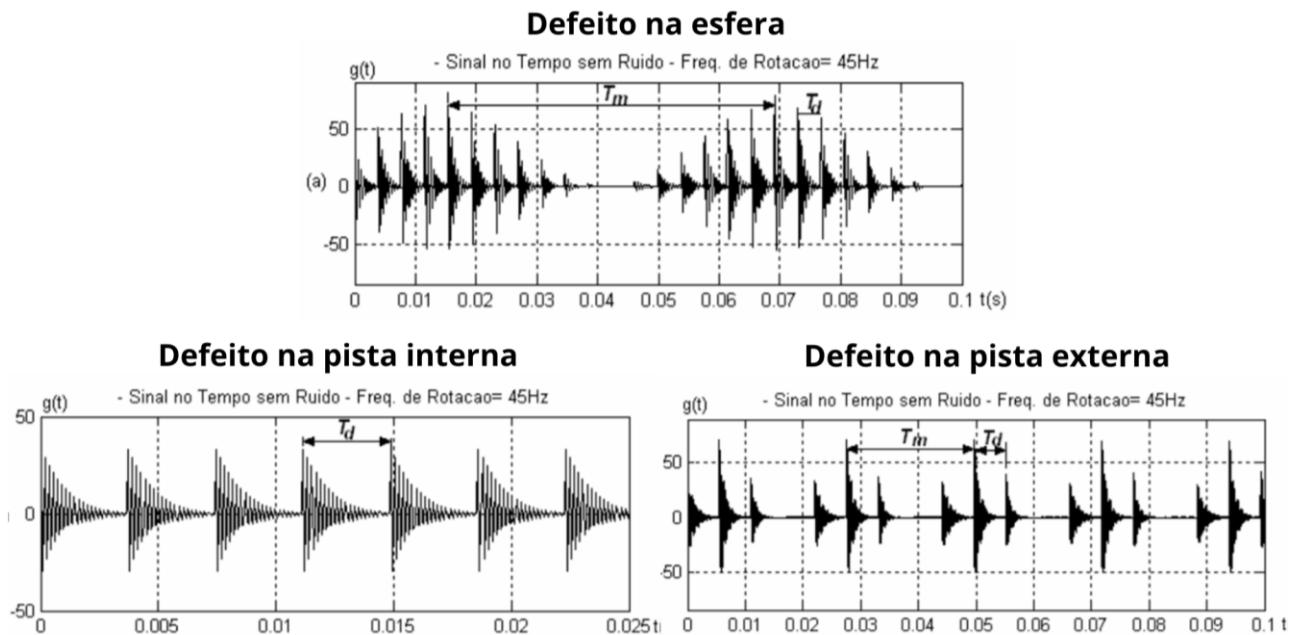


Figura 2. Sinais teóricos da amplitude no tempo sem ruído de defeitos em rolamentos (Bezerra, 2004)

Dado os sinais adquiridos, os mesmos podem ser tratados com técnicas de análise de vibração. As principais técnicas utilizadas para análise de vibração, dependem do objeto a ser analisado, algumas técnicas são mais eficientes que outras na determinação de falhas em sistemas mecânicos.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do projeto da bancada, abrangendo as etapas de concepção, fabricação e instrumentação, além dos materiais selecionados para a construção, os processos de fabricação dos componentes e os equipamentos de medição e sensores utilizados na instrumentação da bancada. A Fig. 3 apresenta o fluxograma de projeto e fabricação da bancada.

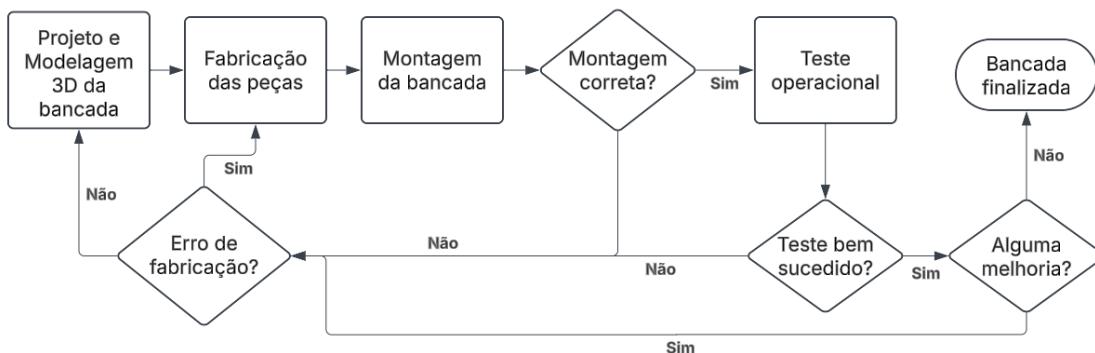


Figura 3. Fluxograma de projeto e fabricação da bancada (Autoria própria, 2025)

### 3.1. Desenvolvimento da bancada

Para viabilizar os ensaios e a indução de falhas, era necessário que os rolamentos pudessem ser desmontados. Para isso, foi utilizado um modelo de rolamento com gaiola de poliamida, que pode ser desmontado e remontado facilmente, permitindo a realização dos experimentos. O rolamento escolhido para estudo foi o modelo SKF 6202, devido as suas dimensões.

Com o objetivo de desenvolver uma bancada prática e viável, foram realizados diversos testes e adaptações até se chegar ao modelo final. Inicialmente, foi adotada uma configuração com rolamento de esferas central, modelo SKF 6204, que suportava toda a carga, funcionando como um braço de alavanca, mas apresentava problemas de mascaramento de sinal e difícil manutenção. Em seguida, tentou-se substituir o rolamento SKF6204 pelo rolamento de agulha modelo SKF NA 4904, como possui uma quantidade maior de elementos girante, acabaria emitindo frequência distante das frequências de interesse, que poderia ser eliminada com a utilização de um filtro, porém este permitia translado axial, gerando ruído e dificultando a análise dos dados. Este modelo pode ser observado na Fig. 4.

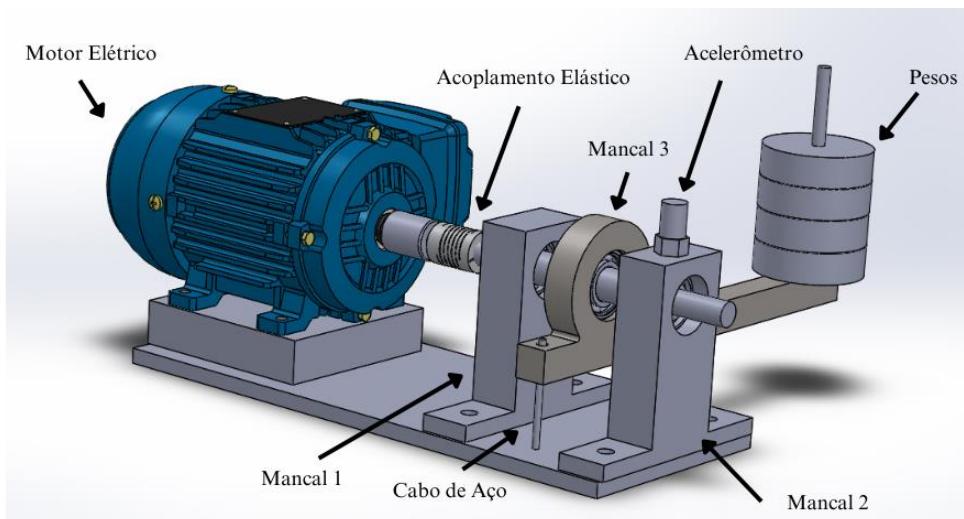


Figura 4. Modelo de bancada com rolamento central (Autoria própria, 2025)

Por fim, optou-se por um modelo mais versátil, com rolamentos idênticos e de fácil substituição, eliminando a necessidade de desmontar o eixo. Essa configuração final permite melhor replicabilidade dos ensaios, maior precisão nos dados e manutenção simplificada, o modelo pode ser observado na Fig. 5.

Esse modelo se destaca pela versatilidade durante as manutenções, permitindo a troca do rolamento de forma rápida e simples com o uso de uma saca-rolamento, sem a necessidade de desmontar o eixo da bancada. Além disso, todos os rolamentos são idênticos, o que reduz a interferência de ruído entre eles. No ensaio, a carga é totalmente aplicada ao rolamento em teste, sendo transmitida pelo sistema de roldanas e cabo. Essa configuração melhora a replicabilidade dos ensaios, minimizando os erros decorrentes de interferências na montagem e desmontagem do rolamento de teste.

Um sistema sem carga, acabaria por mascarar falhas incipientes e não representaria corretamente uma situação real. A bancada proposta possibilita a aplicação da carga, ainda podem ser escolhidos os pesos que serão utilizados, e assim analisar a resposta dos sinais vibratórios com tais variações, tornando a bancada mais versátil.

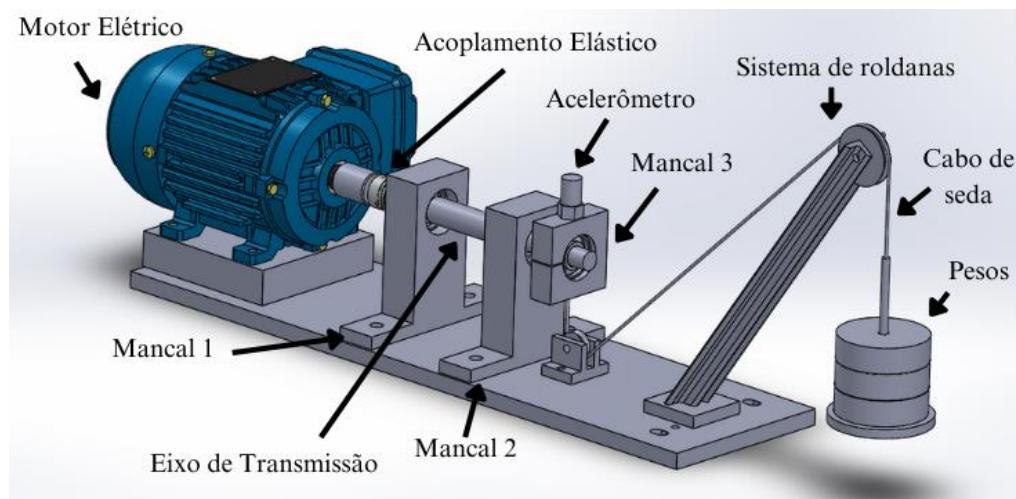


Figura 5. Modelo final da bancada (Autoria própria, 2025)

Após definir o modelo e as dimensões da bancada, buscou-se utilizar materiais já disponíveis, além de avaliar a viabilidade de cada material para sua respectiva aplicação. O motor utilizado possui potência de 1/6 CV e rotação máxima de 1750 rpm, estava disponível no Laboratório de Vibrações da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Para reduzir desalinhamentos, foi utilizado um acoplamento elástico entre o motor e o eixo da bancada. Os mancais 1 e 2 foram confeccionados em alumínio 6061, por sua leveza e capacidade de dissipar energia, facilitando o transporte da bancada. Já o mancal 3, que acopla o rolamento ensaiado, foi feito em aço SAE 1020 devido à sua maior resistência mecânica, necessária para suportar repetidas montagens sem deformações. O eixo, inicialmente de aço SAE 1020 e usinado com tolerância h6 conforme o manual SKF, foi substituído por um eixo em aço SAE 4340 após perda de tolerância dimensional com o uso, garantindo maior durabilidade. A carga é transmitida por um cordão de seda, resistente e flexível. Para a fabricação da bancada foram utilizadas máquinas como CNC de corte a plasma, plaina, torno mecânico e fresa-ferramenteira, assegurando precisão nos encaixes e planicidade das superfícies.

Concluídas as etapas de fabricação, iniciou-se a indução de falhas nos rolamentos por meio de uma retífica elétrica com ponteira diamantada, utilizada para gerar riscos controlados nas pistas e em uma das esferas. Para garantir precisão no processo, foi desenvolvido um suporte que permitiu o uso da retífica acoplada ao torno mecânico, possibilitando avanços uniformes e controlados. As falhas foram induzidas na pista interna, pista externa e em uma esfera, simulando defeitos reais e permitindo a análise do comportamento do rolamento em condições adversas. Na Fig. 6A pode ser observado a indução da falha na pista externa do rolamento, e na Fig. 6B pode ser observada a falha gerada na pista interna do rolamento.

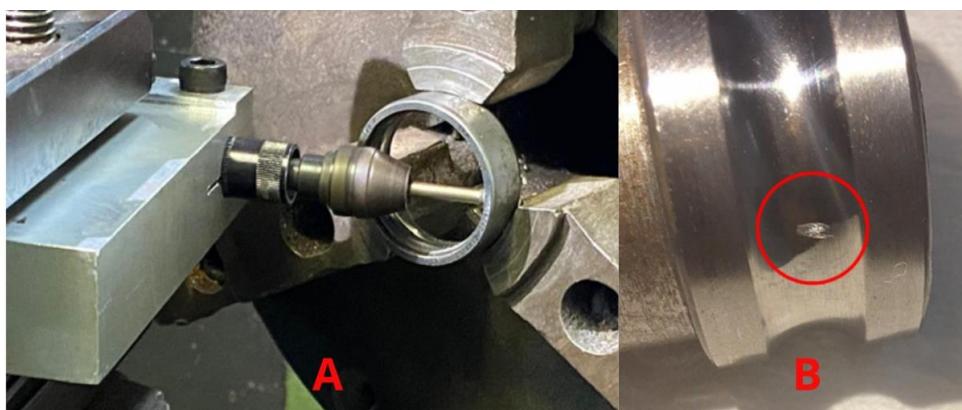


Figura 6. Falha induzida na pista interna do rolamento (Autoria própria, 2025)

Após a desmontagem e indução de falha, os rolamentos são devidamente limpos e remontados, logo após, é adicionado graxa referente a  $\frac{1}{3}$  do espaço livre do rolamento, foi utilizado graxa de lítio de alta qualidade.

### 3.2. Instrumentação da bancada

A bancada conta com um inversor de frequência que permite controlar a rotação do motor, assim, modificando o comportamento oscilatório do sistema. A aquisição dos sinais de vibração é feita com um acelerômetro piezelétrico monoaxial da Brüel & Kjaer, modelo 4383, conectado a um condicionador de sinais um amplificador 2635, que ajusta a sensibilidade, aplica filtro passa-baixa e define a escala de medição, sendo todos os dados coletados em aceleração. O sinal amplificado é visualizado em um osciloscópio Tektronix TDS 1001B, e os dados são transferidos para o computador, onde são processados e visualizados na plataforma GNU Octave. A instrumentação para aquisição de dados pode ser observada na Fig. 7.



Figura 7. Instrumentação da bancada (Autoria própria, 2025)

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a conclusão de todas as etapas de projeto, usinagem e montagem, foi finalizada a bancada experimental, desenvolvida com o objetivo de possibilitar a indução e a análise de falhas em rolamentos. A Fig. 8 apresenta a bancada montada que evidenciam a organização e a funcionalidade do sistema como um todo.



Figura 8. Bancada finalizada (Autoria própria, 2025)

Para a aquisição dos dados, utilizou-se um peso de 1497 g e rotação de 1424 rpm no motor. Inicialmente, foi registrado o sinal de um rolamento sem defeito, caracterizado por ruído gerado pelo funcionamento da estrutura da bancada, como pode ser observado na Fig. 9. Em seguida, foram testados rolamentos com falhas induzidas nas pistas interna e externa, além dos elementos girantes, cujos sinais apresentaram padrões vibratórios distintos e amplitudes superiores ao rolamento íntegro, o sinal dos rolamentos com defeitos podem ser observados na Fig. 10 . A comparação entre os sinais permite a identificação de falhas precoces e valida a eficácia da bancada para fins de monitoramento e diagnóstico. Apesar do ruído presente, os sinais se mostraram compatíveis com os resultados teóricos, demonstrando o sucesso do projeto.

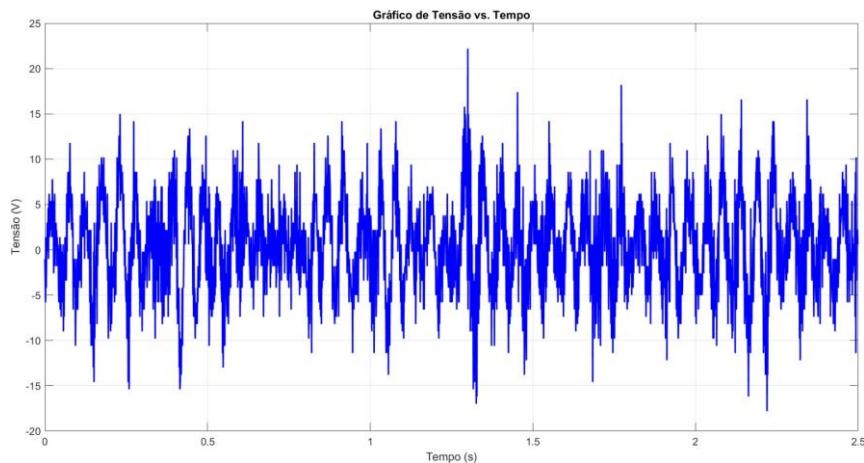


Figura 9. Sinal do rolamento sem defeito (Autoria própria, 2025)

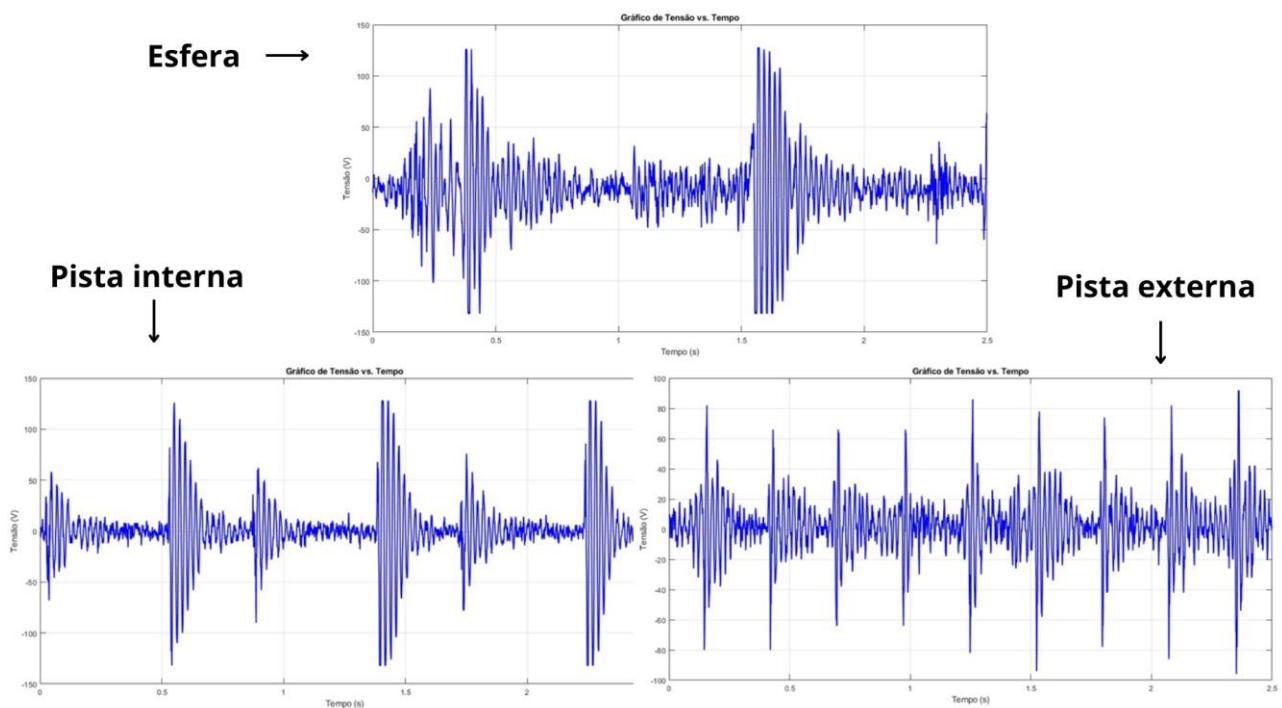


Figura 10. Sinais dos rolamentos com defeito (Autoria própria, 2025)

A comparação entre os sinais com falha e sem falha pode ser observada pela presença dos padrões vibratórios de cada sinal, além da diferença em sua amplitude. O sinal sem falha apresenta baixa amplitude e um padrão ruidoso, enquanto os sinais com falhas induzidas exibem padrões vibratórios característicos, próximos do modelo matemático apresentado na Fig. 2. A análise cuidadosa dessas diferenças permite identificar falhas precoces no sistema, facilitando a manutenção preventiva e a melhoria do desempenho dos componentes.

## 5. CONCLUSÃO

O presente artigo cumpriu os objetivos propostos de maneira eficaz, a bancada desenvolvida demonstrou-se funcional durante os experimentos, sendo bastante didática devido ao seu tamanho e facilidade de manuseio, o que permite seu uso em aulas de forma prática. Um dos pontos cruciais observados na bancada é sua possibilidade de substituição dos rolamentos com falha de forma fácil e rápida, diminuindo de forma significativa o tempo para substituição de rolamentos com falha. Tal fato não é observado em outras bancadas que tem como objetivo a análise de falhas em rolamentos.

Com os mecanismos construídos e os rolamentos desmontáveis, foi possível induzir falhas que simulam defeitos nos rolamentos. O protótipo permitiu a simulação dessas falhas, tanto nas pistas quanto nas esferas dos rolamentos, e a aquisição dos sinais vibratórios essenciais para estudar o comportamento dos rolamentos em sistemas mecânicos. A versatilidade da bancada também permite seu uso em sala de aula, proporcionando aos alunos do curso de Engenharia Mecânica a oportunidade de realizar testes vibratórios de rolamentos e entender sua aplicação na manutenção preditiva. A análise dos sinais vibratórios coletados possibilitou a identificação de padrões característicos de falhas, oferecendo aos estudantes uma experiência prática valiosa para sua formação profissional.

Durante os ensaios, os resultados experimentais obtidos estavam em consonância com a literatura existente. Além disso, a bancada permite a realização de estudos sobre diferentes tipos de falhas em diversos componentes que fazem parte de sua estrutura, este trabalho abre possibilidades para pesquisas futuras, e contribuir para o avanço dos estudos e da manutenção de rolamentos, beneficiando tanto o meio acadêmico quanto o setor industrial.

## 6. REFERÊNCIAS

- ANTONIOLLI, E. B. **Estudo comparativo de técnicas de medição e análise de vibrações para a manutenção preditiva em mancais de rolamentos.** 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999. Orientador: Prof. Ácires Dias.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Confiabilidade e mantinabilidade. Rio de Janeiro, 1994.
- BEZERRA, R. A. **Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração.** 2004. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004. Orientador: Prof. Dr. Robson Pederiva.
- BLOCH, H. P.; GEITNER, F. K. **Practical Machinery Management for Process Plants: machinery failure analysis and troubleshooting.** 3º Edição: Volume 2. Houston - TX: Elsevier, 1999
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 2372: Vibration of machines – Requirements for the measurement and evaluation of vibration severity. Genebra, 1974.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica.** 2. ed. São Paulo: Qualitymark, 2001. ISBN 978-8573033236.
- LAGO, D. F. **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira. São Paulo, p. 175-179. 2007.
- SÁ, Mauro. **Curso de Vibrações.** Macaé-RJ: Petrobras, 2000.
- SKF. Manual de manutenção de rolamentos da SKF. São Paulo: SKF do Brasil, 2012.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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