

Reestruturação de Bancada Didática para Estudo de Balanceamento de Rotores

Palavras chave: Dinâmica de rotores, balanceamento, bancada didática

Aluno(a): Samuel Volpato Queiroz

Orientador(a): Gregory Bregion Daniel

Introdução

Máquinas rotativas estão amplamente presentes na indústria, sendo empregadas em sistemas de geração de energia, ventilação, bombeamento e processos industriais em geral. A falha por desbalanceamento é uma das mais recorrentes nesses equipamentos, resultando em vibrações excessivas, redução da vida útil e risco à integridade estrutural.

Este projeto de iniciação científica tem como objetivo o estudo do comportamento dinâmico de sistemas rotativos e a aplicação de técnicas de balanceamento de rotores, com ênfase no método dos coeficientes de influência. O desbalanceamento em rotores pode causar vibrações excessivas, comprometendo a segurança e o desempenho de máquinas rotativas. Por meio da análise teórica, modelagem numérica e readequação experimental de uma bancada didática, buscou-se investigar e implementar estratégias eficazes de balanceamento.

Metodologia

1. Balanceamento por Coeficiente de Influência:

Este projeto de iniciação científica investiga o comportamento dinâmico de sistemas rotativos, os efeitos do desbalanceamento do rotor na resposta dinâmica e a aplicação da técnica de balanceamento por coeficientes de influência. Para isso, realiza-se uma revisão bibliográfica abrangendo métodos de balanceamento, com ênfase no método dos coeficientes de influência.

O desbalanceamento ocorre quando o centro de massa (m) do rotor não coincide com seu eixo de rotação, criando uma excentricidade (e) e gerando uma força (F) proporcional à velocidade de rotação (Ω), conforme a equação:

$$F = m * e * \Omega^2 \quad (1)$$

O objetivo do balanceamento é reduzir a vibração em todas as velocidades, permitindo operação segura do rotor, inclusive durante aceleração e desaceleração. O método dos coeficientes de influência baseia-se na caracterização do rotor através de diferentes massas de teste, possibilitando a determinação de uma combinação que minimize a resposta síncrona ao desbalanceamento. A amplitude da resposta do rotor pode ser representada como:

$$x(t) = X * \cos(\Omega t + \beta) \quad (2)$$

Inicialmente, mede-se a resposta vibratória (x_1) causada pela massa desbalanceada. Em seguida, adiciona-se uma massa de triagem com peso, fase e excentricidade conhecidos, gerando uma nova amplitude de resposta (x_2). Pela superposição dos efeitos, obtém-se a resposta isolada da massa de triagem:

$$x_3 = x_2 - x_1 \quad (3)$$

Com a amplitude e fase da resposta em frequência e a força gerada pela massa de triagem, calcula-se o coeficiente de influência (IC), definido como a razão entre a força de triagem e a resposta vibratória (x_3):

$$IC = \frac{F_{Triagem}}{x_3} \quad (4)$$

Conhecendo-se a resposta da massa desbalanceada (x_1), determina-se a força de desbalanceamento:

$$F_{Desbalanceamento} = IC * x_1 \quad (5)$$

Para corrigir o desbalanceamento, adiciona-se ao rotor uma massa de mesmo valor que a massa desbalanceada, mas defasada em 180° , neutralizando ou minimizando as vibrações.

2. Estudo e implementação numérica do sistema

A modelagem numérica do sistema rotativo pode ser realizada via Método dos Elementos Finitos, sendo discretizado em elementos de viga de Euler-Bernoulli e elemento de disco rígido. Cada elemento de viga tem 2 nós e 4 graus de liberdade (GDL) por nó, sendo dois deslocamentos lineares e dois deslocamentos angulares.

Dessa forma, obtém-se então a seguinte equação de movimento:

$$M\ddot{r}(t) + [C + \Omega G]\dot{r}(t) + Kr(t) = f(t) \quad (6)$$

em que \ddot{r} , \dot{r} e r são os vetores contendo as acelerações, velocidades e posições de todos os N nós, f é o vetor de forças externas, M , C , G e K são as matrizes globais de inércia, amortecimento, giroscópica e rigidez, Ω é a velocidade de rotação do eixo.

Com as equações montadas, é possível obter a resposta em frequência para o desbalanceamento do eixo e a resposta em frequência para o desbalanceamento com massa de triagem para aplicar no Método do Coeficiente de Influência.

3. Readequação da bancada didática

O rotor foi modelado no software CREO para identificar componentes existentes e necessários para fabricação. Após a modelagem, iniciou-se a manutenção, incluindo pintura, substituição de componentes danificados e manufatura de novos. Além disso, foi desenvolvida uma proteção externa em acrílico para maior segurança e operacionalidade.

Após isso, foram instalados os acelerômetros para coleta dos dados de aceleração linear do rotor e um controlador para aplicar a rotação desejada no mesmo.

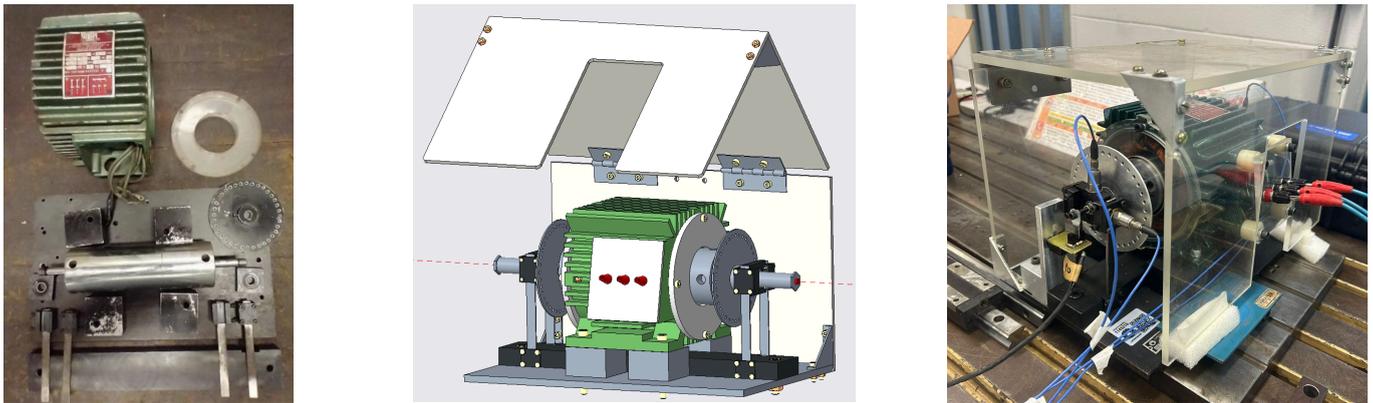


Figura 1: Imagem do rotor no início do projeto, modelo em CAD e finalizada a reforma.

Resultados e discussões

Utilizando o software Matlab, foi implementado numericamente o modelo do método dos coeficientes de influência para simulação do comportamento dinâmico do rotor da bancada didática. O sistema modelado consiste em um eixo rígido de aço com 257 mm de comprimento e 57 mm de diâmetro, apoiado em dois mancais com rigidez de 1×10^8 N/m e amortecimento de 1×10^3 Nm/s e com dois discos delgados com 100 mm de diâmetro onde serão inseridas as massas de triagem. Para validar o método, foi aplicada uma massa desbalanceamento de 1×10^{-3} kg a 90° e uma massa de triagem de 1×10^{-3} kg a 180° . Os gráficos a seguir apresentam os deslocamentos obtidos ao longo do tempo nas direções x e y, destacando o efeito do desbalanceamento e a resposta vibratória do sistema.

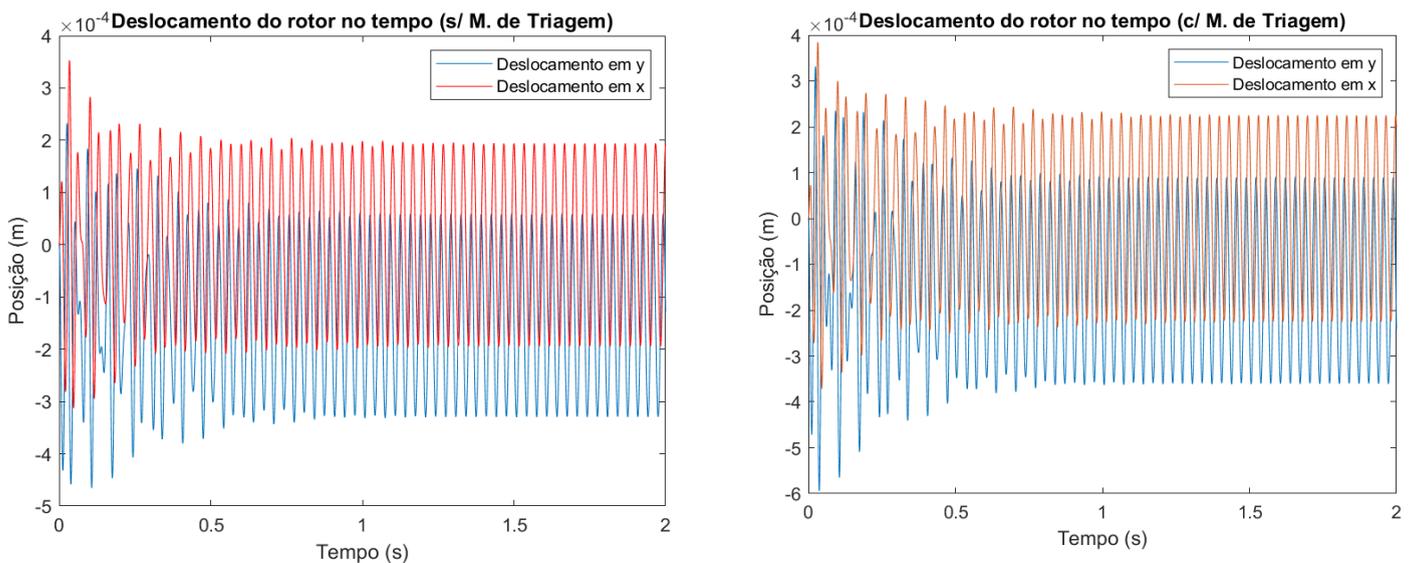


Figura 2: Deslocamento do rotor no tempo sem e com massa de triagem.

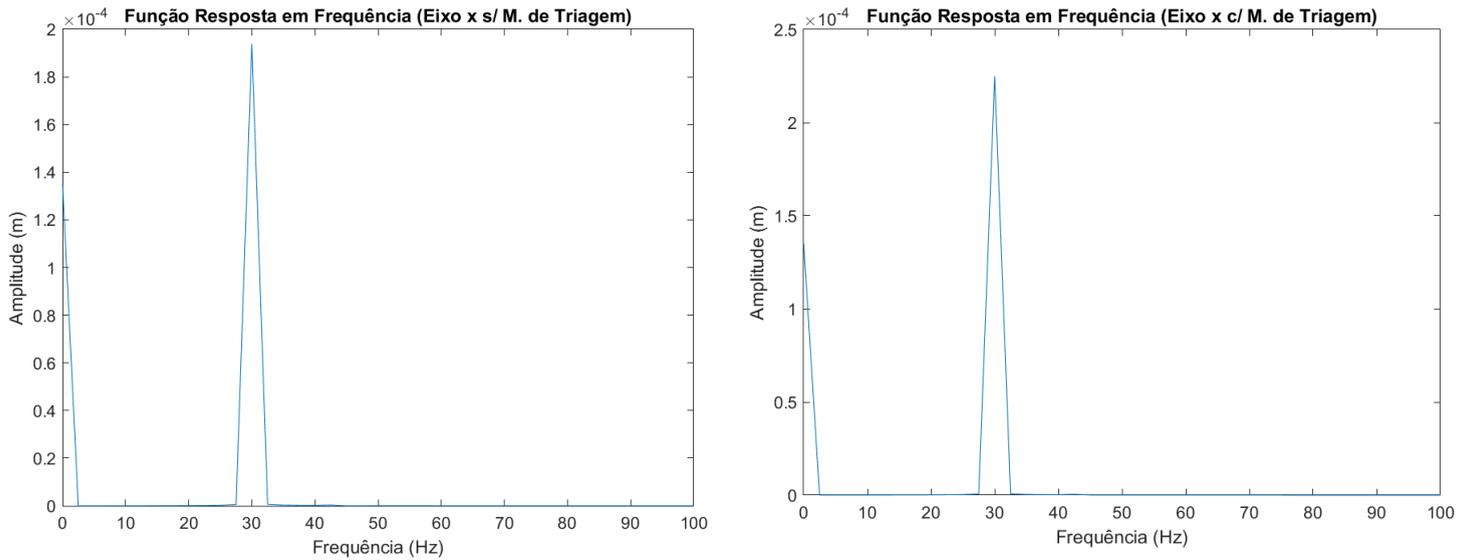


Figura 3: Amplitude da resposta em frequência no eixo x do rotor sem e com massa de triagem.

Nesse modelo, o código indicou que deveria ser colocada uma massa de correção de $1,69952e-3$ na posição de 270° , sendo esta uma aproximação considerada razoável dentro do método.

Na bancada didática, foi aplicado uma velocidade angular de 54 Hz e foram coletados os dados de aceleração e frequência do rotor. A partir do modelo implementado no Matlab e da aplicação do método, foi calculado que o desbalanceamento do rotor era de 4,89 g em 180° , assim, foi colocada uma massa de 5 g defasada em 0° , reduzindo a amplitude de vibração para menos de um décimo do valor original.

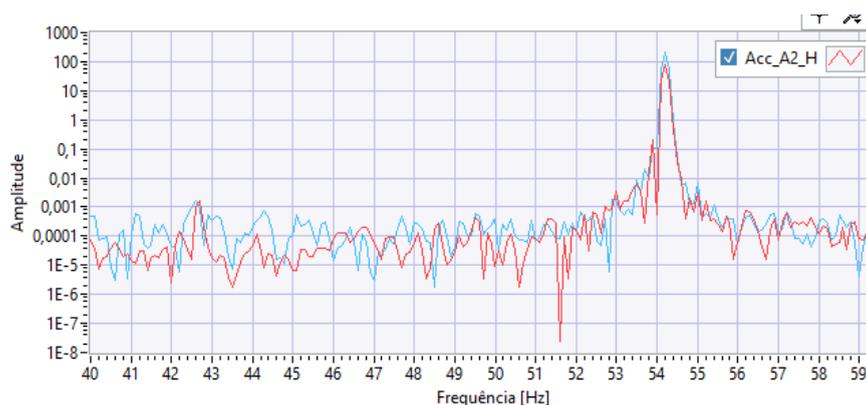


Figura 4: Resposta em frequência do rotor sem a massa de correção

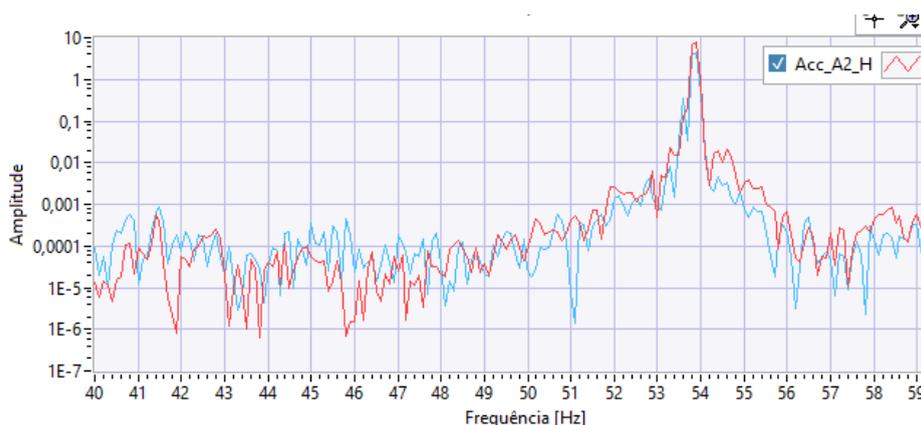


Figura 5: Resposta em frequência do rotor com a massa de correção

Conclusões

O projeto demonstrou a viabilidade da aplicação do método dos coeficientes de influência no balanceamento de rotores, tanto em simulação quanto nos testes experimentais. A modelagem numérica forneceu resultados consistentes e próximos ao ideal teórico, e, com a readequação da bancada, foi possível validar o modelo em ambiente controlado. O aprendizado envolvido, especialmente em modelagem, no uso de ferramentas computacionais, na análise de sinais e no estudo de vibração contribuiu significativamente para a formação técnica do aluno. Adicionalmente, o trabalho possibilitou a reoperacionalização da bancada experimental e o desenvolvimento de programas computacionais de balanceamento, viabilizando sua aplicação em atividades práticas de ensino. Todas as atividades propostas no início da pesquisa foram integralmente concluídas.

Referências bibliográficas

1. DARLOW, Mark S. Balancing of high-speed machinery: theory, methods and experimental results. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 1, n. 1, p. 105-134, 1987. DOI: 0888-3270(87)90087-2.
2. KRAMER, Erwin. *Dynamics of Rotors and Foundations*. Berlin: Springer-Verlag, 1993. DOI: 10.1007/978-3-662-02798-1.
3. CAVALCA, Katia Lucchesi; MACHADO, Tiago Henrique. *IM342 – Análise de Máquinas Rotativas: Modelagem de Eixos – Aula 8 Parte A*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2020.
4. YU, Xiaoping. General Influence Coefficient Algorithm in Balancing of Rotating Machinery. *International Journal of Rotating Machinery*, v. 10, p. 85-90, 2004. DOI: 10.1080/10236210490276674.
5. DEWESOFT. *Single and Dual-plane Rotor Balancing*. Dewesoft d.o.o., 2000-2024. Disponível em: <https://dewesoft.com/products/daq-software/dewesoft-x>. Acesso em: [11/03/2025].