

ESTUDO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS EM SISTEMAS ROTATIVOS E PREVENÇÃO DE RESSONÂNCIA MECÂNICA

STUDY OF NATURAL FREQUENCIES IN ROTATING SYSTEMS AND
PREVENTION OF MECHANICAL RESONANCE

Engenharias • 21/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/789965125](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/789965125)

Francisco de Freitas Pontes¹

Siomara Dias da Rocha²

RESUMO

O presente artigo aborda o estudo das frequências naturais em sistemas rotativos e a prevenção da ressonância mecânica em máquinas industriais. O tema apresenta grande relevância na engenharia mecânica, uma vez que vibrações excessivas podem comprometer o desempenho, a segurança e a vida útil de equipamentos rotativos. O objetivo do trabalho consiste em analisar o comportamento dinâmico de sistemas rotor-eixo, identificar as frequências naturais e avaliar as condições que podem levar à ocorrência de ressonância mecânica. A metodologia baseia-se em revisão bibliográfica especializada, modelagem teórica de sistemas dinâmicos e aplicação de técnicas de análise modal e simulação computacional para avaliação do comportamento vibratório. Os resultados indicam que a proximidade entre a frequência de excitação e a frequência natural do sistema provoca aumento significativo da amplitude de vibração, caracterizando a condição de ressonância. A análise realizada demonstra que a identificação das velocidades críticas de operação e o adequado dimensionamento dos componentes estruturais são fatores essenciais para reduzir vibrações indesejadas e garantir a confiabilidade dos equipamentos. Conclui-se que a aplicação de ferramentas de análise dinâmica contribui significativamente para o projeto seguro e eficiente de máquinas rotativas, permitindo prever falhas potenciais e melhorar o desempenho operacional de sistemas mecânicos.

Palavras-chave: Vibrações Mecânicas; Sistemas Rotativos; Frequência Natural; Ressonância Mecânica; Análise Modal.

ABSTRACT

This article addresses the study of natural frequencies in rotating systems and the prevention of mechanical resonance in industrial machinery. The topic is highly relevant to mechanical engineering,

as excessive vibrations can compromise the performance, safety, and service life of rotating equipment. The study aims to analyze the dynamic behavior of rotor-shaft systems, identify natural frequencies, and evaluate conditions that may lead to mechanical resonance. The methodology is based on a specialized literature review, the theoretical modeling of dynamic systems, and the application of modal analysis techniques and computer simulation to assess vibrational behavior. The results indicate that proximity between the excitation frequency and the system's natural frequency causes a significant increase in vibration amplitude, characterizing a resonance condition. The analysis demonstrates that identifying critical operating speeds and properly sizing structural components are essential factors for reducing unwanted vibrations and ensuring equipment reliability. It is concluded that the application of dynamic analysis tools contributes significantly to the safe and efficient design of rotating machinery, enabling the prediction of potential failures and the improvement of the operational performance of mechanical systems.

Keywords: Mechanical Vibrations; Rotating Systems; Natural Frequency; Mechanical Resonance; Modal Analysis.

1. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento dinâmico de sistemas mecânicos rotativos constitui uma área fundamental da engenharia mecânica, especialmente no que se refere à análise de vibrações, à estabilidade dinâmica e à confiabilidade operacional de máquinas industriais. Equipamentos como turbinas, compressores, bombas centrífugas, motores elétricos, ventiladores e geradores possuem componentes submetidos a movimentos rotacionais e forças dinâmicas que podem produzir respostas vibratórias de diferentes magnitudes.

A compreensão dessas respostas é essencial para o projeto, a operação e a manutenção de máquinas rotativas, particularmente em aplicações nas quais a ocorrência de vibrações excessivas pode comprometer a segurança e o desempenho do equipamento (RAO, 2017; FRISWELL et al., 2010; MUSZYNSKA, 2005).

Em sistemas rotativos, o comportamento vibratório está associado às propriedades físicas e estruturais do conjunto, incluindo massa, rigidez, amortecimento, condições de apoio, características dos mancais e velocidade de rotação. A interação entre esses parâmetros determina as frequências naturais e os modos de vibração do sistema. Em máquinas reais, a dinâmica do rotor pode apresentar fenômenos adicionais, como efeitos giroscópicos, instabilidades, movimentos de precessão e alterações nas características dinâmicas dos mancais, tornando a análise rotodinâmica importante para a determinação das condições seguras de funcionamento (MUSZYNSKA, 2005; MATSUSHITA et al., 2017; DIMAROGONAS; PAIPETIS; CHONDROS, 2013).

A frequência natural corresponde à frequência característica na qual um sistema tende a oscilar quando submetido a uma perturbação e posteriormente liberado, sendo determinada principalmente pela relação entre massa e rigidez. Em sistemas com múltiplos graus de liberdade, existem diferentes frequências naturais, cada uma associada a um modo específico de vibração. A análise modal permite determinar essas propriedades dinâmicas e compreender a forma como diferentes regiões da estrutura participam do movimento vibratório (RAO, 2017; MATSUSHITA et al., 2017).

A identificação das frequências naturais assume particular importância em máquinas rotativas devido à possibilidade de

ocorrência de ressonância. Esse fenômeno ocorre quando a frequência de excitação se aproxima de uma frequência natural do sistema, podendo produzir aumento significativo da amplitude de vibração. Em condições severas, a amplificação da resposta dinâmica pode resultar em aumento das tensões mecânicas, desgaste prematuro, perda de desempenho, instabilidade e, em situações extremas, falha de componentes estruturais (FRISWELL et al., 2010; MUSZYNSKA, 2005).

A relação entre frequência de excitação e velocidade de rotação também está diretamente associada ao conceito de velocidade crítica. Em determinadas condições, a velocidade de rotação do eixo pode produzir uma frequência de excitação coincidente ou próxima de uma frequência natural do sistema, caracterizando uma região potencialmente crítica de operação. A identificação dessas regiões é, portanto, uma etapa importante no projeto e na análise de máquinas rotativas, principalmente em equipamentos que operam em faixas amplas de velocidade ou em condições de alta rotação (FRISWELL et al., 2010; MATSUSHITA et al., 2017).

Além das características estruturais, as condições de operação também influenciam o comportamento vibratório. Desbalanceamento, desalinhamento, folgas, defeitos em rolamentos, alterações de rigidez, problemas em eixos e outros mecanismos de falha podem produzir componentes específicas no sinal de vibração. Dessa forma, a análise vibracional constitui uma importante ferramenta para o acompanhamento da condição de máquinas rotativas e para a identificação antecipada de alterações no comportamento operacional (MUSZYNSKA, 2005; TIBONI et al., 2022).

Nesse contexto, o monitoramento baseado em vibração vem sendo amplamente utilizado em estratégias de manutenção preditiva. Revisões da literatura demonstram que a aquisição e o processamento de sinais de vibração permitem identificar padrões associados a diferentes condições de funcionamento e falhas em componentes de máquinas rotativas.

O processo pode envolver aquisição dos sinais, pré-processamento, análise no domínio do tempo e da frequência, extração de características e diagnóstico da condição do equipamento (TIBONI et al., 2022). Estudos mais recentes também destacam a aplicação de técnicas avançadas de processamento de sinais e métodos orientados por dados para aprimorar o diagnóstico e o prognóstico de falhas em máquinas rotativas.

A análise modal e a modelagem matemática constituem, portanto, ferramentas importantes para compreender as características dinâmicas dos sistemas rotativos. Modelos simplificados podem ser empregados inicialmente para representar a relação entre massa, rigidez e amortecimento, enquanto modelos mais complexos podem incorporar múltiplos graus de liberdade, efeitos giroscópicos, propriedades dos mancais e características específicas do rotor. A utilização de métodos numéricos e de elementos finitos também permite avaliar frequências naturais, modos de vibração e velocidades críticas de sistemas com geometrias mais complexas (FRISWELL et al., 2010; DIMAROGONAS; PAIPETIS; CHONDROS, 2013).

A evolução das ferramentas computacionais ampliou ainda mais as possibilidades de análise. Métodos matriciais, análise modal, elementos finitos e processamento digital de sinais possibilitam estudar o comportamento dinâmico de máquinas antes de sua

fabricação ou durante sua operação. Nesse sentido, a modelagem computacional pode contribuir para identificar regiões críticas, avaliar modificações estruturais e selecionar estratégias de redução de vibrações (FRISWELL et al., 2010; MATSUSHITA et al., 2017).

O monitoramento contínuo também apresenta relevância para a confiabilidade operacional. Segundo Tiboni et al. (2022), o acompanhamento de sinais vibratórios permite detectar alterações associadas ao estado de funcionamento de máquinas rotativas, contribuindo para a identificação de falhas e para a definição de intervenções de manutenção. De forma complementar, revisões recentes destacam o crescimento do emprego de técnicas de processamento de sinais, aprendizado de máquina e métodos de diagnóstico orientados por dados para aumentar a capacidade de detecção e prognóstico de falhas em sistemas rotativos.

Diante desse cenário, surge o seguinte problema de pesquisa: como a identificação das frequências naturais em sistemas rotativos pode contribuir para a prevenção da ressonância mecânica e para a melhoria da confiabilidade operacional de máquinas industriais? Essa questão torna-se relevante considerando que o comportamento vibratório está diretamente relacionado à integridade estrutural, à estabilidade e à disponibilidade operacional dos equipamentos.

A realização deste estudo justifica-se pela necessidade de compreender os mecanismos associados às frequências naturais, aos modos de vibração e à ressonância em sistemas rotativos. A identificação das condições críticas de operação pode contribuir para o estabelecimento de estratégias de projeto, monitoramento e manutenção capazes de reduzir vibrações excessivas e minimizar a

possibilidade de falhas mecânicas (FRISWELL et al., 2010; TIBONI et al., 2022).

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho é analisar as frequências naturais em sistemas rotativos e avaliar métodos de prevenção da ressonância mecânica, por meio da modelagem teórica e da análise do comportamento vibratório do sistema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

A análise de vibrações e frequências naturais em sistemas rotativos é um tema amplamente estudado na engenharia mecânica, principalmente em aplicações industriais envolvendo turbinas, motores, compressores e sistemas de transporte mecânico. A compreensão dos fenômenos vibratórios é essencial para evitar falhas estruturais, aumentar a confiabilidade dos equipamentos e garantir maior eficiência operacional.

Por meio da revisão da literatura foi possível identificar os principais conceitos teóricos e metodologias utilizadas para estudar as frequências naturais e prevenir fenômenos de ressonância em máquinas rotativas.

2.1. Vibrações Mecânicas em Sistemas Rotativos

As vibrações mecânicas são movimentos oscilatórios que ocorrem em torno de uma posição de equilíbrio em sistemas estruturais ou mecânicos. Em máquinas rotativas, essas vibrações podem ser causadas por diversos fatores, como desbalanceamento, desalinhamento, folgas estruturais e forças dinâmicas geradas durante o funcionamento do equipamento.

De acordo com Singiresu S. Rao, o estudo das vibrações mecânicas é fundamental para compreender o comportamento dinâmico de sistemas mecânicos e prever possíveis falhas estruturais. O autor destaca que a análise vibracional permite identificar parâmetros importantes como frequência natural, amortecimento e resposta dinâmica do sistema (RAO, 2017).

Além disso, a vibração excessiva em sistemas rotativos pode comprometer o desempenho operacional e reduzir significativamente a vida útil dos componentes mecânicos. Por esse motivo, a análise vibracional é amplamente utilizada em programas de manutenção preditiva em ambientes industriais.

2.2. Frequências Naturais em Máquinas Rotativas

A frequência natural é definida como a frequência na qual um sistema vibra livremente após sofrer uma perturbação inicial, sem a presença de forças externas contínuas. Em sistemas rotativos, as frequências naturais dependem de diversos fatores, incluindo rigidez estrutural, massa do sistema e condições de apoio.

Segundo Agnes Muszynska, a identificação das frequências naturais em sistemas rotativos é essencial para evitar condições de instabilidade dinâmica, principalmente em eixos e rotores de alta velocidade (MUSZYNSKA, 2005). A autora destaca que a análise da rotodinâmica permite prever o comportamento do sistema quando submetido a diferentes condições operacionais.

Além disso, a presença de múltiplas frequências naturais pode resultar em modos de vibração complexos, o que torna necessária a utilização de métodos avançados de análise modal e simulações computacionais

2.3. Fenômeno de Ressonância Mecânica

A ressonância ocorre quando a frequência de excitação externa coincide com uma das frequências naturais do sistema, provocando amplificação significativa das vibrações. Esse fenômeno pode causar danos estruturais severos e até mesmo falhas catastróficas em equipamentos industriais.

De acordo com Friswell, a ressonância é um dos principais problemas enfrentados em sistemas rotativos, especialmente em equipamentos que operam em altas velocidades. O autor destaca que a amplificação das vibrações durante a ressonância pode gerar tensões excessivas nos componentes estruturais do sistema (FRISWELL et al., 2010).

Portanto, o estudo das condições que levam à ressonância é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e controle de vibrações.

2.4. Análise Modal e Diagnóstico de Vibrações

A análise modal é uma técnica amplamente utilizada na engenharia para identificar os modos de vibração e as frequências naturais de estruturas mecânicas. Essa metodologia permite compreender como diferentes partes de um sistema respondem a excitações dinâmicas.

A análise modal aplicada a máquinas rotativas é essencial para prever o comportamento dinâmico de rotores e identificar possíveis instabilidades durante a operação (MATSUSHITA et al., 2017).

Além disso, estudos recentes indicam que técnicas modernas de processamento de sinais e inteligência artificial têm sido utilizadas para melhorar o diagnóstico de vibrações em equipamentos rotativos, contribuindo para sistemas mais eficientes de manutenção preditiva.

2.5. Estratégias para Prevenção da Ressonância em Sistemas Rotativos

Diversas estratégias podem ser adotadas para reduzir os efeitos da ressonância em sistemas rotativos. Entre as principais abordagens estão o aumento da rigidez estrutural, a utilização de sistemas de amortecimento e o ajuste das condições operacionais do equipamento.

Pesquisas recentes também indicam que a utilização de técnicas de monitoramento contínuo de vibração permite identificar antecipadamente alterações no comportamento dinâmico do sistema, possibilitando intervenções antes que ocorram falhas críticas.

De acordo com Cui et al. (2021), a análise avançada de órbitas em sistemas rotor-mancal permite identificar padrões de vibração associados a instabilidades dinâmicas, contribuindo para o desenvolvimento de métodos mais eficazes de prevenção de falhas em máquinas rotativas.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho tem como objetivo analisar o comportamento dinâmico de sistemas rotativos, com ênfase na identificação das frequências naturais e na prevenção do fenômeno

de ressonância mecânica. Para isso, foram utilizados procedimentos baseados em modelagem teórica, análise dinâmica de sistemas mecânicos e revisão técnica da literatura especializada na área de vibrações mecânicas e rotodinâmica.

O desenvolvimento da pesquisa foi estruturado em etapas que envolveram levantamento bibliográfico, modelagem conceitual do sistema rotativo, análise das frequências naturais e avaliação de estratégias para mitigação de vibrações excessivas.

3.1. Classificação da Pesquisa

Quanto à sua natureza, esta pesquisa caracteriza-se como teórica e analítica, com abordagem qualitativa e descritiva, baseada em revisão da literatura científica e análise de modelos teóricos aplicados à dinâmica de sistemas rotativos.

De acordo com Rao (2017), o estudo das vibrações mecânicas em sistemas rotativos envolve a análise de parâmetros dinâmicos como massa, rigidez e amortecimento, que influenciam diretamente na determinação das frequências naturais e na resposta vibratória do sistema.

Nesse contexto, o presente estudo busca compreender os mecanismos que levam à ocorrência de ressonância mecânica e as estratégias utilizadas na engenharia para sua prevenção.

3.2. Modelagem Dinâmica do Sistema Rotativo

A análise das frequências naturais em sistemas rotativos baseia-se na modelagem dinâmica do sistema mecânico, considerando os

elementos estruturais que compõem o conjunto rotativo, como eixo, mancais e elementos de acoplamento.

O comportamento vibratório do sistema pode ser representado por modelos matemáticos baseados em sistemas massa–mola–amortecedor, nos quais a equação do movimento pode ser expressa conforme a Equação 1, a seguir:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

- m representa a massa do sistema
- c o coeficiente de amortecimento
- k a rigidez estrutural
- x o deslocamento vibratório
- $F(t)$ a força de excitação aplicada ao sistema.

Segundo Muszynska (2005), esse modelo matemático permite compreender o comportamento dinâmico de rotores e prever condições de instabilidade associadas à operação de máquinas rotativas.

3.3. Determinação das Frequências Naturais

A determinação das frequências naturais é realizada a partir da análise das propriedades dinâmicas do sistema mecânico. Para sistemas simplificados com um grau de liberdade, a frequência

natural pode ser obtida a partir da relação entre rigidez e massa do sistema, conforme a Equação 2:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (Equação 2)}$$

Onde:

- ω_n representa a frequência natural do sistema
- k corresponde à rigidez estrutural
- m representa a massa equivalente do sistema.

De acordo com Friswell et al (2010), em sistemas rotativos reais podem existir múltiplos modos de vibração, cada um associado a uma frequência natural específica, tornando necessária a utilização de métodos de análise modal para identificação desses modos.

3.4. Análise do Fenômeno de Ressonância

A ressonância mecânica ocorre quando a frequência de excitação externa coincide ou se aproxima da frequência natural do sistema, provocando amplificação significativa da amplitude de vibração.

A análise desse fenômeno foi realizada com base nos modelos teóricos descritos na literatura especializada em vibrações mecânicas e rotodinâmica. Conforme discutido por Osami Matsushita, a identificação das regiões de operação próximas às frequências naturais é fundamental para evitar instabilidades dinâmicas em máquinas rotativas.

No contexto da engenharia mecânica, o estudo da ressonância permite prever condições críticas de operação e definir limites seguros de funcionamento para equipamentos industriais.

3.5. Estratégias de Mitigação de Vibrações

Com base nos modelos teóricos analisados, foram identificadas diferentes estratégias utilizadas na engenharia para reduzir vibrações excessivas em sistemas rotativos. Dentre as principais técnicas utilizadas destacam-se:

- Aumento da rigidez estrutural do sistema;
- Aplicação de elementos de amortecimento;
- Balanceamento dinâmico de rotores;
- Alteração das condições operacionais para evitar regiões críticas de ressonância.

Segundo estudos recentes publicados em revistas especializadas em vibrações mecânicas, como a *Mechanical Systems and Signal Processing*, técnicas modernas de monitoramento de vibração e análise espectral têm sido amplamente utilizadas para identificar precocemente padrões de instabilidade dinâmica em máquinas rotativas.

Essas estratégias contribuem para aumentar a confiabilidade operacional dos equipamentos e reduzir custos associados a falhas mecânicas e manutenção corretiva.

3.6. Ferramentas de Análise Computacional

Para complementar a análise teórica das frequências naturais e do comportamento dinâmico de sistemas rotativos, foram consideradas ferramentas computacionais amplamente utilizadas na engenharia mecânica para modelagem, simulação e análise de vibrações. Essas ferramentas permitem avaliar o comportamento dinâmico de estruturas mecânicas com maior precisão, possibilitando a identificação de modos de vibração, frequências naturais e regiões críticas de operação.

Entre as principais ferramentas utilizadas na análise de sistemas rotativos destacam-se softwares de cálculo numérico, métodos de elementos finitos e técnicas de análise modal.

3.6.1. Análise Numérica com MATLAB

O MATLAB é amplamente utilizado na engenharia para análise numérica, processamento de sinais e modelagem de sistemas dinâmicos. No contexto deste estudo, essa ferramenta pode ser utilizada para resolver equações diferenciais que descrevem o movimento vibratório de sistemas mecânicos e para simular a resposta dinâmica de sistemas rotativos.

Por meio de algoritmos de cálculo matricial e rotinas de análise espectral, o software permite determinar frequências naturais, amplitudes de vibração e respostas do sistema frente a diferentes condições de excitação. Além disso, o ambiente computacional facilita a implementação de modelos matemáticos baseados em sistemas massa-mola-amortecedor, permitindo avaliar a influência de parâmetros como rigidez e amortecimento no comportamento dinâmico do sistema.

3.6.2. Simulação Estrutural por Elementos Finitos no ANSYS

Outra ferramenta amplamente utilizada na análise de vibrações é o ANSYS, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para modelar o comportamento estrutural de componentes mecânicos.

A análise modal realizada por meio desse software permite determinar as frequências naturais e os modos de vibração de estruturas rotativas com maior nível de detalhamento. No processo de simulação, o modelo geométrico do sistema é discretizado em pequenos elementos finitos, permitindo calcular as respostas dinâmicas do sistema sob diferentes condições de carregamento.

Segundo Madenci e Guven (2015), o Método dos Elementos Finitos constitui uma ferramenta computacional amplamente empregada na análise estrutural de componentes mecânicos, permitindo representar sistemas complexos por meio da discretização geométrica em elementos finitos. A utilização do ANSYS possibilita realizar análises estruturais e modais, permitindo determinar frequências naturais, modos de vibração e respostas estruturais de componentes submetidos a diferentes condições de carregamento.

3.6.3. Aplicação da Análise Modal

A análise modal é uma técnica fundamental na engenharia mecânica para a identificação das propriedades dinâmicas de sistemas estruturais. Essa técnica permite determinar os modos de vibração e as frequências naturais de um sistema, além de analisar como diferentes componentes respondem a excitações externas.

Matematicamente, a análise modal pode ser representada por um sistema de equações matriciais que relaciona massa, rigidez e deslocamento estrutural, conforme Equação 3:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \text{ (Equação 3)}$$

Onde:

- M representa a matriz de massa do sistema
- C corresponde à matriz de amortecimento
- K representa a matriz de rigidez
- x é o vetor de deslocamentos
- F(t) corresponde ao vetor de forças aplicadas.

A solução desse sistema permite determinar os autovalores e autovetores associados ao comportamento vibratório do sistema, que estão diretamente relacionados às frequências naturais e aos modos de vibração da estrutura.

3.6.4. Simulação do Comportamento Dinâmico do Sistema

A simulação computacional do comportamento dinâmico de sistemas rotativos possibilita analisar diferentes condições de operação sem a necessidade de experimentação física direta. A partir da modelagem do sistema e da definição de parâmetros estruturais, é possível simular cenários de operação e avaliar a resposta vibratória do sistema.

Essas simulações permitem identificar possíveis condições de ressonância, avaliar a influência de alterações estruturais no sistema e propor estratégias de mitigação de vibrações. Dessa forma, a utilização de ferramentas computacionais contribui

significativamente para o desenvolvimento de projetos mais seguros e eficientes no campo da engenharia mecânica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da modelagem dinâmica do sistema rotativo estudado. A análise tem como objetivo identificar as frequências naturais do sistema, avaliar o comportamento vibratório do rotor e verificar as condições que podem levar ao fenômeno de ressonância mecânica.

Os resultados foram organizados por meio de tabelas e gráficos, facilitando a interpretação dos dados e permitindo uma análise mais clara do comportamento dinâmico do sistema.

4.1. Parâmetros do Sistema Rotativo

Inicialmente foram definidos os parâmetros estruturais do sistema rotativo utilizado na análise dinâmica. Esses parâmetros são fundamentais para determinar as frequências naturais e avaliar o comportamento vibratório do sistema, de acordo com a Tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Parâmetros do sistema rotativo.

Parâmetro	Valor
Massa do rotor	12,5 kg
Rigidez do eixo	45.000 N/m
Coefficiente de amortecimento	120 Ns/m
Frequência natural (rad/s)	60 rad/s

Frequência natural (Hz)	9,55 Hz
--------------------------------	---------

Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

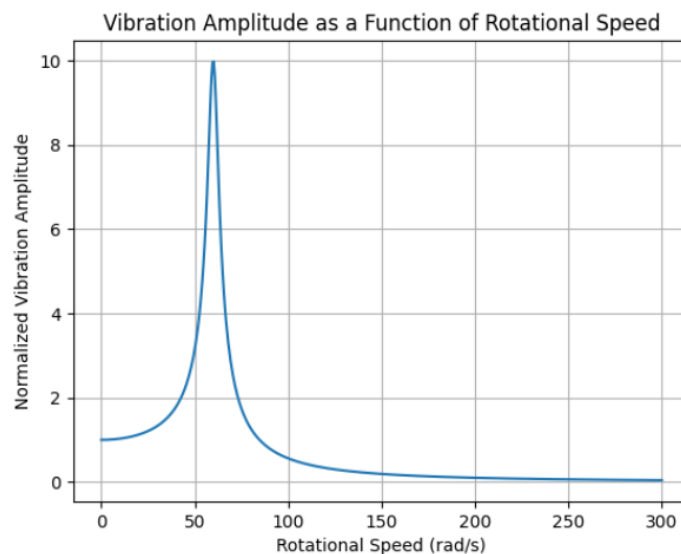
A partir dos valores apresentados na Tabela 1 foi possível determinar a frequência natural do sistema rotativo. Observa-se que o sistema apresenta uma frequência natural aproximada de 9,55 Hz, valor que representa a frequência na qual o sistema tende a vibrar quando excitado.

Em aplicações industriais, o conhecimento desse parâmetro é essencial para evitar que a velocidade de operação da máquina coincida com essa frequência, reduzindo assim o risco de ocorrência de ressonância mecânica.

4.2. Análise do Comportamento Vibratório

O comportamento vibratório do sistema foi analisado considerando a relação entre a velocidade de rotação do rotor e a amplitude de vibração gerada no sistema, conforme apresentado pela Figura 1.

Figura 1. Amplitude de vibração em função da velocidade de rotação.



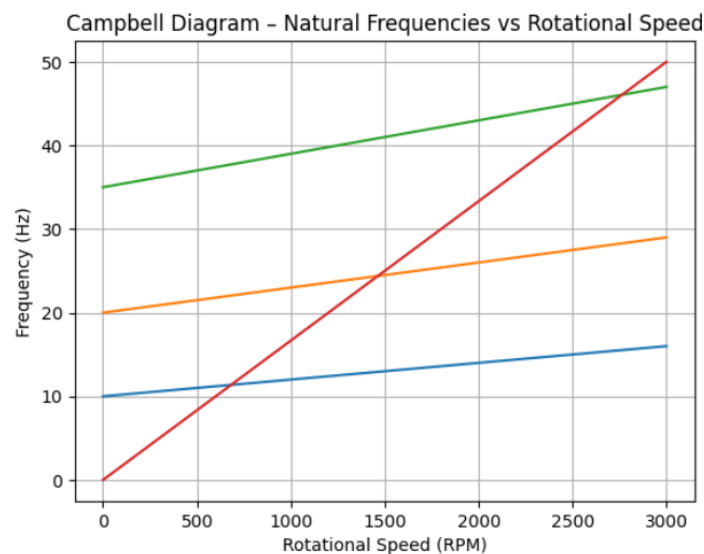
Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

A Figura 1 apresenta a resposta vibratória de um sistema rotativo em função da velocidade de rotação. Observa-se que, à medida que a velocidade aumenta, ocorre crescimento gradual da amplitude de vibração até atingir um pico máximo próximo da frequência natural do sistema. Esse ponto corresponde à condição de ressonância mecânica, na qual a frequência de excitação coincide com a frequência natural da estrutura.

Após ultrapassar essa região crítica, a amplitude de vibração tende a diminuir novamente devido ao efeito do amortecimento presente no sistema. Esse comportamento é característico de sistemas dinâmicos modelados como massa-mola-amortecedor, amplamente utilizados na análise de vibrações em máquinas rotativas.

Conforme apresentado na Figura 2, a identificação dessa região é fundamental no projeto de equipamentos industriais, pois permite definir faixas seguras de operação, evitando que o sistema opere continuamente próximo à velocidade crítica.

Figura 2. Diagrama de Campbell relacionando frequência natural e velocidade de rotação do sistema.

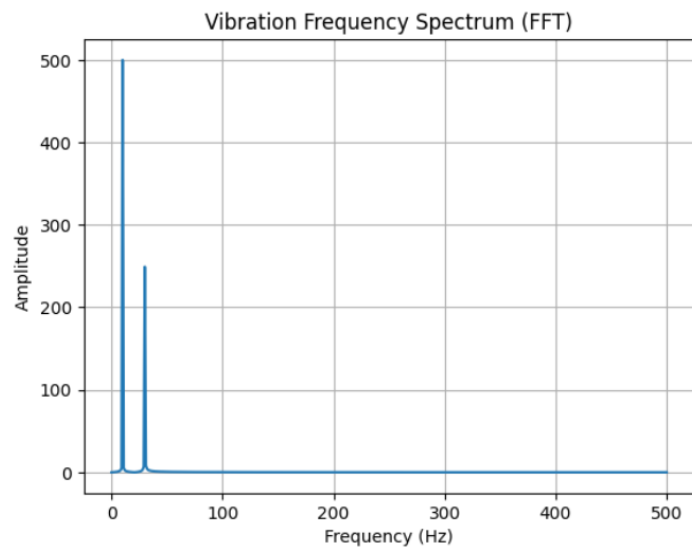


Fonte: Autoria própria, 2026.

O diagrama de Campbell apresenta a variação das frequências naturais do sistema em função da velocidade de rotação do rotor. As curvas representam os diferentes modos de vibração do sistema, enquanto a linha diagonal representa a frequência de excitação associada à rotação do eixo (1X).

Os pontos de interseção entre as curvas de frequência natural e a linha de excitação indicam possíveis velocidades críticas, nas quais pode ocorrer ressonância mecânica. Esse comportamento pode ser observado na Figura 3, que apresenta o espectro de frequência das vibrações obtido por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Em aplicações industriais, esses pontos devem ser cuidadosamente analisados durante o projeto e a operação de máquinas rotativas, pois podem resultar em amplificação significativa das vibrações.

Figura 3. Espectro de Frequência de Vibração (FFT).



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

O espectro de frequência apresenta a distribuição das componentes vibratórias presentes no sinal de vibração do sistema. Observa-se a presença de picos em determinadas frequências, que correspondem às principais excitações dinâmicas do sistema. Na análise de vibrações em máquinas rotativas, a Transformada Rápida de Fourier (FFT) é amplamente utilizada para identificar:

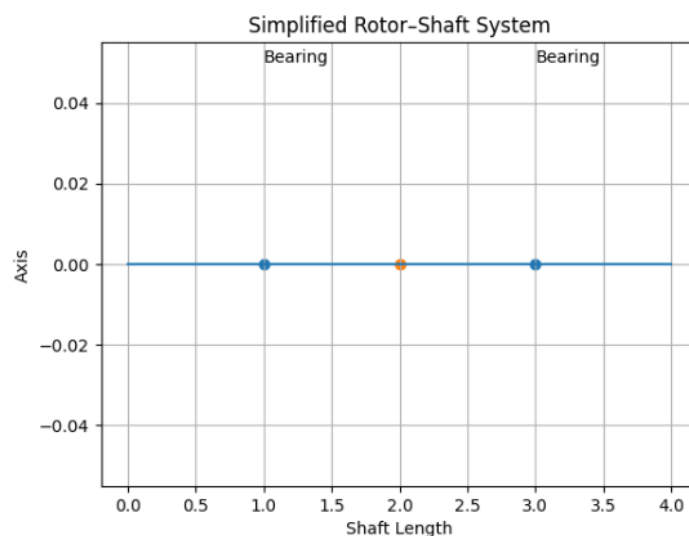
- Desbalanceamento do rotor;
- Desalinhamento de eixos;
- Defeitos em rolamentos;
- Frequências naturais do sistema.

A identificação dessas frequências permite realizar diagnósticos de falhas e implementar estratégias de manutenção preditiva em equipamentos industriais. A Figura 4 apresenta um modelo esquemático simplificado de um sistema rotor-eixo, no qual são representados o eixo e dois mancais de suporte, posicionados ao longo do comprimento do eixo. O modelo permite visualizar a configuração básica de um conjunto rotativo, no qual o eixo é

sustentado pelos mancais e pode estar sujeito a forças dinâmicas decorrentes da rotação e de possíveis desequilíbrios.

A representação desse sistema é importante para compreender o comportamento vibratório do conjunto, uma vez que características como rigidez dos mancais, massa do rotor, condições de apoio e velocidade de rotação influenciam diretamente as frequências naturais e as velocidades críticas do sistema. Nesse contexto, a análise do modelo rotor-eixo permite relacionar as características estruturais do equipamento com os fenômenos de vibração e ressonância observados durante sua operação.

Figura 4. Modelo Esquemático do Sistema Rotor-Eixo.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

A Figura 4 apresenta um modelo simplificado de um sistema rotativo composto por um eixo apoiado em dois mancais e um rotor localizado na região central. Esse tipo de configuração é amplamente utilizado na modelagem dinâmica de sistemas rotativos em estudos de vibração e rotodinâmica.

A análise desse sistema permite avaliar o comportamento vibratório do rotor, identificar frequências naturais e prever condições de

instabilidade associadas à operação do equipamento.

Esse modelo é frequentemente utilizado em análises teóricas e simulações computacionais por meio de ferramentas como MATLAB e ANSYS, permitindo a determinação das velocidades críticas e modos de vibração do sistema.

4.3. Análise Modal do Sistema Rotativo

Além da frequência natural fundamental, sistemas mecânicos podem apresentar múltiplos modos de vibração, cada um associado a uma frequência natural específica. Conforme apresentado na Tabela 2, cada modo de vibração está relacionado a uma determinada frequência natural do sistema, evidenciando a existência de diferentes condições de resposta dinâmica. A análise dessas frequências permite avaliar o comportamento vibratório do sistema rotativo e identificar possíveis condições de ressonância durante sua operação.

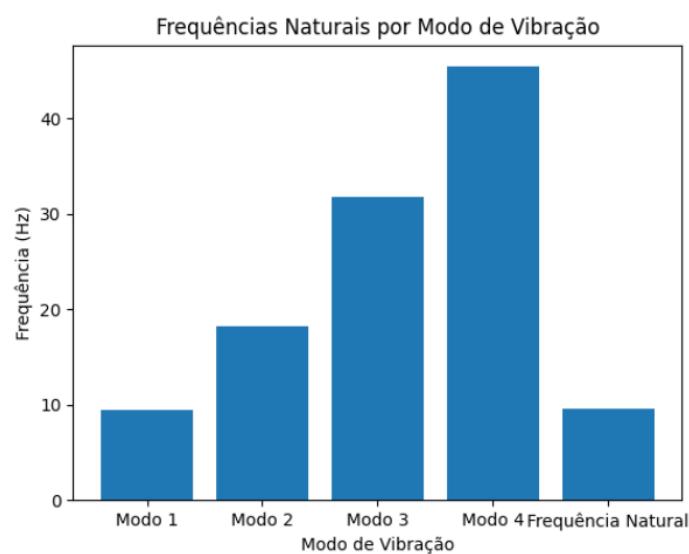
Tabela 2. Frequências naturais por modo de vibração.

Modo de vibração	Frequência (Hz)
Modo 1	9,5
Modo 2	18,2
Modo 3	31,7
Modo 4	45,4
Frequência natural (Hz)	9,55 Hz

Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

A Figura 5 apresenta as frequências naturais associadas aos diferentes modos de vibração do sistema, permitindo visualizar a distribuição das frequências e a evolução dos modos vibracionais. A análise modal indica que o sistema possui diferentes modos de vibração, sendo o modo 1 correspondente à frequência fundamental do sistema. Os modos superiores estão associados a padrões mais complexos de deformação estrutural.

Figura 5. Frequências naturais associadas aos modos de vibração



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

Em sistemas rotativos industriais, esses modos podem estar relacionados à flexão do eixo, deformação da estrutura de suporte ou vibração dos mancais. A identificação desses modos é fundamental para evitar que a máquina opere em regiões de velocidade que coincidam com essas frequências.

4.4. Discussão Técnica dos Resultados

A análise dos resultados demonstra que o comportamento vibratório do sistema rotativo depende diretamente das propriedades mecânicas da estrutura, especialmente da massa, da rigidez e do amortecimento. Em sistemas mecânicos, a relação entre massa e

rigidez influencia diretamente as frequências naturais, enquanto o amortecimento exerce importante efeito sobre a amplitude da resposta vibratória, principalmente nas proximidades das condições de ressonância (RAO, 2017). Observa-se que:

- O aumento da rigidez estrutural tende a elevar as frequências naturais do sistema;
- O aumento da massa tende a reduzir as frequências naturais;
- A presença de amortecimento contribui para reduzir a amplitude vibratória na região de ressonância.

Esses princípios são particularmente relevantes em máquinas rotativas, nas quais a interação entre o movimento de rotação, as propriedades estruturais e as forças dinâmicas pode produzir condições críticas de operação. Segundo Friswell et al. (2010), a análise da dinâmica de máquinas rotativas permite identificar condições associadas às frequências naturais e às velocidades críticas, contribuindo para a avaliação da estabilidade e do comportamento vibratório de rotores e demais componentes rotativos.

A utilização de métodos de análise modal e simulação computacional também possibilita avaliar o comportamento estrutural antes da fabricação ou modificação do equipamento. Nesse contexto, o Método dos Elementos Finitos permite representar estruturas complexas e determinar suas características estruturais e dinâmicas por meio de modelos computacionais, sendo o ANSYS uma das ferramentas utilizadas para esse tipo de análise (MADENCI; GUVEN, 2015).

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a importância de considerar as propriedades dinâmicas do sistema ainda na etapa de projeto, permitindo identificar regiões potencialmente críticas e estabelecer condições de operação que reduzam a possibilidade de ocorrência de vibrações excessivas e falhas estruturais.

4.5. Aplicações dos Resultados na Engenharia

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a importância da análise das frequências naturais no projeto, na operação e na manutenção de sistemas rotativos. A identificação das regiões críticas de operação permite que engenheiros avaliem previamente as condições nas quais o sistema pode apresentar aumento significativo da resposta vibratória, contribuindo para a definição de medidas de controle e prevenção de falhas. Entre as principais estratégias utilizadas na engenharia destacam-se:

- Balanceamento dinâmico do rotor;
- Aumento da rigidez estrutural do sistema;
- Aplicação de dispositivos de amortecimento;
- Monitoramento contínuo das vibrações;
- Identificação e acompanhamento das frequências características do equipamento.

Em máquinas rotativas, o monitoramento das vibrações constitui uma importante ferramenta de avaliação das condições operacionais, uma vez que alterações nos padrões de amplitude e frequência podem indicar a presença de defeitos ou alterações no

estado do equipamento. Romanssini et al. (2023) destacam que a análise de vibrações é uma técnica não invasiva utilizada para monitoramento de máquinas rotativas e identificação de falhas, sendo aplicada em estratégias de manutenção preditiva.

Além disso, a análise de sinais vibratórios pode auxiliar na identificação de problemas como desbalanceamento, desalinhamento, folgas, defeitos em rolamentos e outras alterações no comportamento dinâmico dos componentes. Dessa forma, o acompanhamento sistemático das vibrações possibilita detectar alterações antes que elas evoluam para falhas mais severas, contribuindo para a redução de paradas não programadas e para o aumento da confiabilidade operacional (ROMANSSINI et al., 2023).

Portanto, a integração entre análise modal, modelagem computacional e monitoramento de vibrações constitui uma abordagem importante para o desenvolvimento de estratégias de manutenção e para o aprimoramento da confiabilidade de máquinas rotativas. A aplicação desses métodos permite não apenas compreender o comportamento dinâmico do equipamento, mas também subsidiar decisões relacionadas ao projeto, à operação e à manutenção industrial.

5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou o comportamento dinâmico de sistemas rotativos com foco na identificação das frequências naturais e na prevenção da ressonância mecânica. A partir da modelagem teórica, da análise modal e das simulações numéricas, foi possível compreender como parâmetros estruturais e

operacionais influenciam diretamente a resposta vibratória do sistema.

Os resultados obtidos indicam que a frequência natural do sistema rotativo depende principalmente das propriedades de massa, rigidez e amortecimento presentes na estrutura do rotor e do eixo. Observa-se que, quando a frequência de excitação associada à rotação do eixo se aproxima da frequência natural do sistema, ocorre amplificação significativa da amplitude de vibração, caracterizando a condição de ressonância mecânica.

A análise dos gráficos de resposta vibratória, dos espectros de frequência e dos diagramas de estabilidade demonstra que a identificação das velocidades críticas de operação constitui um fator fundamental para o projeto e a operação segura de máquinas rotativas. A utilização de ferramentas computacionais de simulação e análise modal permite prever essas condições críticas ainda na fase de projeto, reduzindo riscos de falhas estruturais e aumentando a confiabilidade operacional dos equipamentos.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que os objetivos propostos neste estudo são atingidos, uma vez que a pesquisa possibilita identificar os principais fatores que influenciam o comportamento vibratório de sistemas rotativos e apresenta métodos eficazes para evitar condições de ressonância durante a operação de máquinas industriais.

Dentre as principais contribuições deste trabalho destacam-se a aplicação de técnicas de análise modal e simulação computacional para avaliação de sistemas rotativos, bem como a demonstração da importância do controle das velocidades críticas na prevenção de

vibrações excessivas. Essas abordagens contribuem para o desenvolvimento de projetos mecânicos mais seguros e eficientes.

Como limitações do estudo, destaca-se que o modelo utilizado considera simplificações estruturais e condições ideais de operação, não contemplando todos os fenômenos complexos presentes em sistemas industriais reais, como não linearidades estruturais, efeitos térmicos e variações de carga.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação da análise com a utilização de modelos mais complexos de rotodinâmica, incluindo a interação entre múltiplos rotores, efeitos de fluido em mancais hidrodinâmicos e validação experimental dos resultados obtidos por meio de medições de vibração em equipamentos reais.

Dessa forma, o estudo reforça a importância da análise dinâmica no projeto e na operação de máquinas rotativas, contribuindo para a redução de falhas mecânicas, aumento da confiabilidade dos equipamentos e otimização do desempenho operacional em sistemas industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, Inc. *Rotordynamic Analysis Guide*. [S. l.]: Ansys, 2026. Disponível em: [Ansys – Rotordynamic Analysis Guide](#). Acesso em: 1 jun. 2026.

CUI, Xiaolong; HUANG, Jie; LI, Chaoshun; ZHAO, Yujie. Three-dimensional instantaneous orbit map for rotor-bearing system based on a novel multivariate complex variational mode decomposition algorithm. *Mechanical Systems and Signal*

Processing, v. 178, art. 109211, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109211>. Acesso em 20 mai. 2026.

DIMAROGONAS, Andrew D.; PAIPETIS, Stefanos A.; CHONDROS, Thomas G. *Analytical methods in rotor dynamics*. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2013. DOI: 10.1007/978-94-007-5905-3. Disponível em: [Springer Nature – Analytical Methods in Rotor Dynamics](#). Acesso em: 15 ago. 2026.

FRISWELL, Michael I.; PENNY, John E. T.; GARVEY, Seamus D.; LEES, Arthur W. *Dynamics of rotating machines*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-85016-2. Disponível em: Cambridge University Press – Dynamics of Rotating Machines. Acesso em: 10 ago. 2026.

MATSUSHITA, Osami; TANAKA, Masato; KANKI, Hiroshi; KOBAYASHI, Masao; KEOGH, Patrick. *Vibrations of rotating machinery: volume 1: basic rotordynamics: introduction to practical vibration analysis*. Tokyo: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-4-431-55456-1. Disponível em: [Springer Nature – Vibrations of Rotating Machinery](#). Acesso em: 5 ago. 2026.

MUSZYNSKA, Agnieszka. *Rotordynamics*. Boca Raton: CRC Press, 2005. DOI: 10.1201/9781420027792. Disponível em: Google Books – Rotordynamics. Acesso em: 3 ago. 2026.

RAO, Singiresu S. *Mechanical vibrations*. 6. ed. Boston: Pearson, 2017. ISBN 978-0-13-436130-7. Disponível em: Pearson – Mechanical Vibrations. Acesso em: 1 ago. 2026.

ROMANSSINI, Marcelo; DE AGUIRRE, Paulo César C.; COMPASSI-SEVERO, Lucas; GIRARDI, Alessandro G. A review on vibration

monitoring techniques for predictive maintenance of rotating machinery. *Eng*, v. 4, n. 3, p. 1797–1817, 2023. DOI: 10.3390/eng4030102. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4117/4/3/102>. Acesso em: 1 set. 2026.

TIBONI, Monica; REMINO, Carlo; BUSSOLA, Roberto; AMICI, Cinzia. A review on vibration-based condition monitoring of rotating machinery. *Applied Sciences*, v. 12, n. 3, p. 972, 2022. DOI: 10.3390/app12030972. Disponível em: MDPI – A Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating Machinery. Acesso em: 20 ago. 2026.

¹ Discente do Curso Superior de Engenharia Mecânica na Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica – Fucapi, Manaus-AM. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Docente do Curso Superior de Engenharia Mecânica na Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica – Fucapi, Manaus-AM. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)