



CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE LINS PROF. ANTONIO SEABRA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DA QUALIDADE

MAYARA CRISTINA ESTARQUE BATISTA

**ANÁLISE VIBRACIONAL DE MANCAIS EM SISTEMAS DE
ROTOR: SIMULAÇÃO NUMÉRICA E IMPLICAÇÕES NA
MANUTENÇÃO INDUSTRIAL E QUALIDADE**

Escaneie a imagem para verificar a autenticidade do documento
Hash SHA256 do PDF original 9ae549ec1b302cca0d65a1a8de0d77ae8a96c58a92f948b911059c54ec9fd355
<https://valida.ae/b9f2b9079647410a83c334cf122a7783bf4b936828b8dd21c>

LINS/SP
2º SEMESTRE/2024





CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE LINS PROF. ANTONIO SEABRA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DA QUALIDADE

MAYARA CRISTINA ESTARQUE BATISTA

**ANÁLISE VIBRACIONAL DE MANCAIS EM SISTEMAS DE
ROTOR: SIMULAÇÃO NUMÉRICA E IMPLICAÇÕES NA
MANUTENÇÃO INDUSTRIAL E QUALIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Tecnologia de Lins Prof. Antônio
Seabra, para obtenção do Título de Tecnólogos em
Gestão Da Qualidade

Orientador: Dr. Roberto Outa.

LINS/SP
2º SEMESTRE/2024

Escaneie a imagem para verificar a autenticidade do documento
Hash SHA256 do PDF original 9ae549ec1b302cca0d65a1a8de0d77ae8a96c58a92f948b911059c54ec9fd355
<https://valida.ae/b9f2b9079647410a83c334cf122a7783bf4b936828b8dd21c>





Batista, Mayara Cristina Estarque

B333a

Análise Vibracional De Mancais em Sistemas de Rotor: Simulação Numérica e Implicações na Manutenção Industrial e Qualidade / Mayara Cristina Estarque Batista. — Lins, 2024.

18f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Gestão da Qualidade) — Faculdade de Tecnologia de Lins Professor Antonio Seabra: Lins, 2024.

Orientador(a): Dr. Roberto Outa

1. Vibração. 2. Mancais de Rolamento. 3. Simulação Numérica. 4. Manutenção industrial. 5. Qualidade. I. Outa, Roberto . II. Faculdade de Tecnologia de Lins Professor Antonio Seabra. III. Título.

CDD 658.562





MAYARA CRISTINA ESTARQUE BATISTA

**ANÁLISE VIBRACIONAL DE MANCAIS EM SISTEMAS DE
ROTOR: SIMULAÇÃO NUMÉRICA E IMPLICAÇÕES NA
MANUTENÇÃO INDUSTRIAL E QUALIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Tecnologia de Lins Prof. Antônio
Seabra, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Tecnólogo em Gestão da Qualidade sob
orientação do Prof. Dr. Roberto Outa

Data de aprovação: ____/____/____

Orientador: Dr. Roberto Outa

Examinador: Ma. Alyssa Carolina Barbosa Marques Gedo

Examinador: Me. Reinaldo de Oliveira Nocchi





SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 ROTORES DINÂMICOS.....	6
3 MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS.....	8
3.1 ESTATÍSTICA APLICADA A ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE SINAIS....	10
3.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS	12
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	12
5 DISCUSSÃO GERAL.....	16
6 CONCLUSÃO.....	17
REFERÊNCIAS	18





ANÁLISE VIBRACIONAL EM MANCAIS EM SISTEMAS DINÂMICOS: SIMULAÇÃO NUMÉRICA E IMPLICAÇÕES NA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL E QUALIDADE

Mayara Cristina Estarque Batista ¹
Prof. Dr. Roberto Outa ²

¹ Acadêmica do Curso de Gestão da Qualidade da Faculdade de Tecnologia de Lins Prof. Antônio Seabra – Fatec, Lins – SP, Brasil

² Docente do Curso de Tecnologia em Gestão da Qualidade da Faculdade de Tecnologia de Lins Prof. Antônio Seabra – Fatec, Lins – SP, Brasil

RESUMO

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise detalhada do comportamento vibracional de mancais "bom" e "ruim" em um sistema de rotor, utilizando simulação numérica, ao qual, através da modelagem das equações diferenciais que descrevem o deslocamento lateral do eixo, considerando parâmetros como massa, constante de rigidez e coeficiente de amortecimento. A motivação deste trabalho para a manutenção industrial é importante, pois fornece insights sobre o comportamento vibracional de mancais em diferentes estados. Através da análise detalhada, utilizando simulação numérica e modelagem de equações diferenciais, é possível identificar padrões de vibração em mancais "bom" e "ruim", permitindo a detecção precoce de desgaste, falhas iminentes e outras condições adversas. Do ponto de vista da engenharia da qualidade, a capacidade de identificar anomalias precocemente, como desgaste e falhas iminentes, permite compreender as características de funcionamento de um componente, melhorando a capacidade com que a qualidade pode ser estabelecida em operações industriais. O resultado mostra a efetividade da aplicação das equações, cujos resultados mostram diferentes tipos de ondas vibracionais.

Palavras-chave: Vibração. Mancais de Rolamento. Simulação Numérica. Manutenção industrial. Qualidade.

ABSTRACT

The objective of this work is to perform a detailed analysis of the vibrational behavior of "good" and "bad" bearings in a rotor system, using numerical simulation. Through the modeling of the differential equations that describe the lateral displacement of the axis, considering parameters such as mass, stiffness constant and damping coefficient. The motivation of this work for industrial maintenance is important as it provides insights into the vibrational behavior of bearings in different states. Through detailed analysis, using numerical simulation and differential equation modeling, it is possible to identify vibration patterns in "good" and "bad" bearings, allowing early detection of wear, impending failures, and other adverse conditions. From a quality engineering perspective, the ability to identify. Anomalies early, such as wear and impending failures, allows you to understand the operating characteristics of a component, improving the ability with which quality can be established in industrial operations.

Keywords: Vibration. Bearing Bearings. Numerical Simulation. Industrial maintenance. Quality.





1 INTRODUÇÃO

As mudanças significativas que afetaram a economia e a sociedade ao longo de décadas têm se intensificado nos últimos anos, principalmente devido à pandemia de coronavírus, cujas ramificações ainda não foram completamente compreendidas. O desenvolvimento econômico está se tornando cada vez mais complexo de ser rastreado, em parte devido aos avanços contínuos das tecnologias digitais e das aplicações que se apoiam em inteligência artificial. Observamos uma transformação significativa ocorrendo no campo da tecnologia, na personalização em larga escala e na manufatura avançada. É evidente que os robôs estão ganhando um papel crescentemente relevante em diversas esferas, como indústria, logística, cuidados, administração e educação, como um fator determinante de vantagem econômica. Esse destaque é particularmente notável quando consideramos as tecnologias que integram competências humanas e robóticas, através de interfaces cérebro máquina, e o rápido progresso na inteligência artificial (Mazur 2023).

Assim o atual cenário econômico global está passando por uma nova revolução industrial, com várias tendências indicando essa transformação. A persistente crise econômica global e a ineficácia das soluções existentes apontam para a exaustão do modelo tecnológico anterior. A superprodução e dificuldades de venda levaram à falência de empresas e ao aumento de medidas protecionistas. A teoria econômica moderna sugere que a superação da crise exige inovações, fortalecidas pelo progresso em economias baseadas no conhecimento. Pesquisas recentes resultaram em novas tecnologias de produção, mas ainda não foram amplamente implementadas. Iniciativas de modernização técnica têm como objetivo atingir um desenvolvimento inovador sem precedentes, visando vantagens competitivas únicas em um mercado global competitivo. A hipótese deste estudo é que a Indústria 4.0 é a revolução industrial do século XXI, com seu foco em tecnologias de alta tecnologia e inovação (Popkova et al., 2019).

O diagnóstico de falhas baseado em modelos é uma abordagem que visa detectar falhas em processos técnicos, como atuadores, componentes e sensores, por meio da medição de variáveis de entrada e saída. Isso é alcançado usando métodos de isolamento e detecção de falhas que envolvem etapas como observadores de saída, equações de paridade e identificação de parâmetros. Esses métodos geram resíduos a partir da comparação entre as variáveis medidas e as geradas por modelos matemáticos. Os Métodos orientados por dados para o diagnóstico de falhas, consiste na estimação de parâmetros e, os métodos baseados em observadores são as técnicas mais frequentemente aplicadas para a detecção de falhas, especialmente para a detecção de falhas em sensores e processos. Na maioria das aplicações, a detecção de falhas é apoiada por lógica de limiar simples ou teste de hipóteses. O isolamento de falhas frequentemente é realizado usando métodos de classificação (Puig e Simani, 2021).

Este trabalho tem como objetivo analisar de forma detalhada o comportamento vibracional de mancais em dois estados distintos, "bom" e "ruim", dentro de um sistema de rotor. A relevância deste estudo reside na sua aplicabilidade à manutenção industrial, pois oferece insights valiosos sobre os padrões vibracionais associados a diferentes estados dos mancais. Através dessa análise minuciosa, torna-se possível identificar padrões de vibração distintos entre os estados "bom" e "ruim", permitindo uma detecção precoce de desgastes, falhas iminentes e outras condições adversas. Sob a perspectiva da engenharia de qualidade, essa capacidade de identificar anomalias em estágios iniciais contribui para uma melhor compreensão do





funcionamento dos componentes, aprimorando a garantia da qualidade nas operações industriais.

Diferentes pesquisas foram desenvolvidas para auxiliar em processos de reconhecimento de falhas em sistemas dinâmicos, especificamente em rotores dinâmicos, o qual, pode-se observar que, este pesquisador demonstra a aplicação dos sistemas imunológicos artificiais (AISs) para a detecção de falhas em rotores dinâmicos, cujo resultado demonstra que a aplicação é robusta e pode ser aplicado em indústrias como ferramentas de manutenção industrial (Outa et al., 2020). Outro pesquisador estuda um método de otimização Nelder-Mead baseado em CFD para se obter uma função objetivo, com a finalidade da influência de uma otimização de critério único da geometria do rotor no desempenho da turbina ORC em uma ampla gama de condições de operação. O resultado demonstra parâmetros de melhoria e afinidade para projetos de melhorias (Witanowski et al., 2023).

2 ROTORES DINÂMICOS

A compreensão da dinâmica na física, abrange não apenas os aspectos do movimento e deformação, mas também os princípios fundamentais da mecânica analítica, cinemática e cinética. A aplicação dos conceitos matemáticos é importante para descrever o comportamento dinâmico de corpos ou sistemas, fornecendo uma visão detalhada de seus diferentes estados sob condições específicas. No entanto, antes de explorar profundamente esses conceitos, é essencial entender a trajetória histórica que os originou, destacando os principais pesquisadores e sua contribuição para o desenvolvimento dos estudos em sistemas dinâmicos (Outa, 2017).

Pelos estudos de Outa (2017), os conceitos da dinâmica têm início por Aristóteles (384-322 a.C.), o qual desenvolveu diferentes teorias que envolviam o campo da física, uma delas descreve quatro elementos, a terra, o ar, a água e o fogo, e as suas relações dinâmicas exemplificadas na natureza. Resultando em características que constituem o movimento do objeto, ou seja, a função e o seu propósito. Após são vistos os trabalhos de Galileu Galilei (1564-1642) em *Le Meccanich*; Isaac Newton (1642-1727) publica *Mathematical Principles of Natural Philosophy* em 1687, obra considerada mais influente na história da ciência, a qual descreve a lei da gravitação universal e as três leis que fundamentam a mecânica clássica. Após Leonhard Paul Euler (1707-1783) demonstra matematicamente as equações de rotação de um corpo qualquer; Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) explica a filosofia da mecânica; Pierre Simon Marquis de Laplace (1749-1827) traduz o estudo geométrico da mecânica clássica utilizada por Isaac Newton (1642-1727).

O rotor de Jeffcott teve o seu início em 1895, considerando a sua evolução nos estudos de velocidade crítica e especificações de auto centragem, demonstrando assim o deslocamento lateral e o efeito giroscópio (Kramer, 1993). As investigações destes fenômenos em sua grande maioria, foram fundamentadas por motivos de problemas ou falhas em máquinas, cujo conjunto de rotor deveria girar suavemente e de maneira estável em rolamentos (Vance et al., 2010).

O termo desbalanceamento tem o significado de distribuição não uniforme da massa de um rotor em torno do seu eixo de rotação e pode ser definido ainda como a condição que existe em um rotor quando a força ou movimento vibratório é transmitido aos seus rolamentos como resultado da força centrífuga. As vibrações são principalmente causadas pela excitação resultante do desbalanceamento inevitável nas massas dos rotores. O desbalanceamento residual é inevitável devido a várias razões, como erros de fabricação, deformação térmica, variações no material,





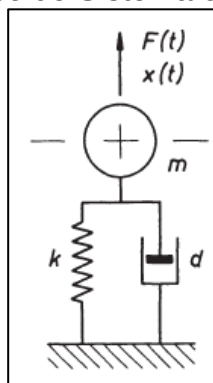
desgaste e corrosão. Esse desbalanceamento também pode ser causado pelo acúmulo de tolerâncias durante a montagem. Mesmo quando um rotor é bem balanceado e montado em um eixo equilibrado, as tolerâncias necessárias para a montagem permitem que o rotor se desloque radialmente, levando ao desbalanceamento. (Ishida e Yamamoto, 2012).

A vibração de um rotor depende da geometria, dos tipos de suportes e das forças de excitação, ao qual, um rotor vibrando excita a sua base e gera influência em seu conjunto rotor. O rotor de Jeffcott com um grau de liberdade pode ser demonstrado matematicamente através da seguinte equação,

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

ao qual, m é a massa; c é o amortecimento; k é a constante elástica; x o deslocamento; $\ddot{x} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$ a componente da aceleração no tempo, e $\dot{x} = \frac{\partial x}{\partial t}$ a componente da velocidade no tempo, $F(t)$ corresponde a uma força atuante no sistema no domínio do tempo. A figura 1 mostra um desenho esquemático da representação do modelo da equação geral do movimento (Kramer, 1993).

Figura 1 - Desenho Esquemático do Sistema com um Grau de Liberdade



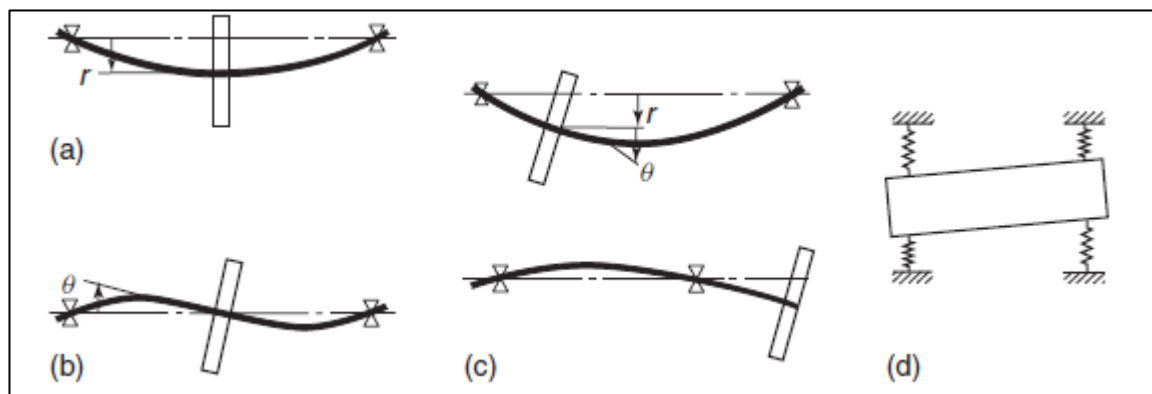
Fonte: Kramer, 1993, p.7.

A figura 1.2 mostra diversos fenômenos de problemas em rotores apoiados em dois eixos, dos quais frequentemente modelos matemáticos são adotados na análise de vibrações de rotores.





Figura 2 – Modelos de Fenômenos em Rotores Dinâmicos



Fonte: Ishida e Yamamoto, 2012.

Note que, o disco é montado em um eixo com variação de posicionamento longitudinal, o modelo de 2 DOF (Figura 2.2a), conhecido como rotor Jeffcott, é amplamente empregado na análise teórica de rotores. O modelo de 2 DOF (Figura 2.2b) executa movimento de inclinação, com o momento giroscópico influenciando as frequências naturais conforme a velocidade de rotação. Esse é o modelo mais simples com características únicas de sistemas de rotores, sendo mais adequado para certos problemas de vibração do que o rotor Jeffcott. Modelos de 4 DOF (Figura 2.2c) combinam movimentos de deflexão e inclinação, enquanto a Figura 2.2d mostra um rotor rígido com suporte elástico, governado por equações similares às do modelo 4 DOF. O termo DOF significa degree of freedom (Ishida e Yamamoto, 2012). A equação geral do deslocamento lateral pode ser escrita como

$$m\ddot{x}_G + C_{ex}\dot{x}_C + k_{ei}x_{xC} = 0 \quad (2)$$

$$m\ddot{y}_G + C_{ex}\dot{y}_C + k_{ei}y_{yC} = 0 \quad (3)$$

o qual, estas equações foram decompostas para representar dois sentidos em um plano cartesiano x e y, sendo, x a direção vertical e y a horizontal, e a que está intrínseca z a direção da profundidade (Yoon et al., 2013).

3 MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS

A indústria é um processo de organização dos recursos como pessoas, materiais, tecnologias, entre outros, conjuntamente com as estratégias e metas organizacionais. As várias partes de uma organização são feitas objetivando a estruturação da indústria, considerando os sistemas de interação de entrada e saída de informações. Esta estrutura tem capacidade dinâmica que continuamente responde a mudanças tecnológicas, processos e desenvolvimento encontrados para a sobrevivência do negócio, (Ben-Daya et al., 2009).

A manutenção industrial atua diretamente na produção, o que, consequentemente, afeta os custos de produção. Para que se consiga controlar os custos de produção, são introduzidas diferentes ferramentas de gestão que não só medem, mas também auxiliam na melhoria da produtividade e qualidade, consequentemente, reduzindo o tempo de setup da máquina. Os indicadores para se entender o estado da produção e do processo produtivo são variados, podemos citar as técnicas matemáticas que controlam e melhoram a qualidade do produto: controle





estatístico do processo – CEP padrão; seis sigmas; entre outras; as técnicas comportamentais e organizacionais, para melhora e aumento de produtividade são: kaizen; Poka Yoke; kanban; Just in time; house-keeping; já as técnicas de planejamento são: PDCA; sistemas da qualidade; diagrama de Ishikawa; diagrama de Pareto; entre outras. A manutenção pode ser considerada como a ação de diferentes técnicas administrativas e gerenciais, atuantes no ciclo de vida de um produto, objetivando na manutenção e/ou restauração do estado atual ao inicial de uma máquina, cuja função definida em processo possa ser desenvolvida quando operante (Manzini et al, 2010).

A manutenção industrial é dividida em diferentes técnicas, cuja aplicação fica a critério da escolha e forma que a indústria opera. Assim, as técnicas de manutenção podem ser divididas em corretiva não planejada, corretiva planejada, preventiva, preditiva, detectiva e engenharia da manutenção. Desta forma, as técnicas são apresentadas detalhadamente como:

- A manutenção corretiva pode ser entendida como o ato do conserto, a troca efetiva da peça, e as características desta são: planejada e não planejada. Portanto a manutenção corretiva não planejada ocorre com a quebra aleatória do componente da máquina, parando-a sem a intervenção do operador, enquanto, a manutenção corretiva planejada, parte do princípio em que a máquina é parada por algo já pré-determinado, sendo um cronograma, um sensor, ou alguma informação que pare a máquina, desde que não seja uma quebra de componentes da máquina;
- A manutenção preventiva é o ato da parada da máquina para a manutenção desta, utilizando um cronograma, geralmente elaborado com o histórico de paradas de máquinas, e a qualidade da peça, após a troca é analisada averiguando o tempo de vida útil e as condições técnicas como desgaste, materiais, entre outros. Esta técnica visa contribuir antecipando a troca da peça ou componente, sem a quebra da mesma, o qual pode ocorrer que o tempo de vida útil desta, possa não ser utilizado na sua totalidade;
- A manutenção preditiva pode ser entendida como a análise da vida útil da peça e seu estado, feita pelo incremento de sensores a mesma. Contudo a opção de escolha da utilização do uso da peça na sua totalidade de vida útil até a quebra é da opção do operador, visto que, esta decisão é tomada quando se tem o controle dessas características, e pela condição da parada da linha de produção;
- A manutenção detectiva pode ser entendida como a atuação efetuada de proteção buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção;
- A engenharia da manutenção, última técnica a ser comentada, prevê a importância da garantia da operação das máquinas e da funcionalidade da mesma, considerando o enfoque humanístico, ou seja, esta técnica visa auxiliar o melhoramento da produtividade e do volume de produção treinando o operador para utilizar os procedimentos das máquinas, como também, melhorar as condições de uso da mesma, considerando as habilidades e técnicas de engenharia (Kardex e Nascif, 2002).

Ao se manter a máquina operando sem uma parada por quebra e/ou falha de uma peça ou componente, preservando as capacidades funcionais das máquinas e equipamentos, desempenhando a sua função planejada em projeto, entende-se o princípio da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), o qual surgiu em 1968 e era uma norma que certificava linhas aéreas na indústria da aviação dos EUA conhecida pela sigla *MSG – 1²* (Maintenance Steering Group). A engenharia da





confiabilidade é a disciplina que está relacionada com o tratamento probabilístico de falhas em sistemas (Lees, 1991). Nos estudos de confiabilidade são abordadas as formas:

- Qualitativas, pelo estudo dos modos de falha e suas consequências para o sistema. É a abordagem utilizada na manutenção centrada na confiabilidade.
- Quantitativas, pela medição de número de falhas, tempo de parada e custos associados em manutenção e perda de produção. É a abordagem estatística, no qual o sistema é modelado por distribuição de probabilidade de falha, como por exemplo a distribuição de Weibull (Teles, 1992).

3.1 ESTATÍSTICA APLICADA A ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE SINAIS

A Estatística é uma disciplina utilizada em diversas áreas do conhecimento, cujo objetivo principal é extrair informações úteis e significativas a partir de conjuntos de dados, permitindo a compreensão de fenômenos complexos e a tomada de decisões informadas, desta forma, seu processo pode ser desenvolvido utilizando a coleta, organização, análise e interpretação de dados (Rodrigues e Lemma, 2014).

Os principais conceitos da Estatística incluem:

- População e Amostra: A população é o conjunto completo de elementos que estamos interessados em estudar, enquanto a amostra é uma parte representativa da população que é selecionada para análise.
- Variável: Uma característica ou atributo que pode assumir diferentes valores. As variáveis podem ser classificadas como qualitativas (categóricas) ou quantitativas (numéricas).
- Dados: São as informações coletadas e registradas para análise estatística. Podem ser obtidos por meio de observações, experimentos ou pesquisas.
- Medidas Descritivas: São técnicas utilizadas para resumir e descrever as características dos dados, como média, mediana, moda, desvio padrão, entre outras.
- Inferência Estatística: Processo de tirar conclusões sobre uma população com base em informações obtidas de uma amostra. Envolve a utilização de métodos probabilísticos para fazer estimativas e testar hipóteses (Rodrigues e Lemma, 2014).

As diferentes categorias da estatística são:

- Estatística Descritiva: Envolve a organização, resumo e apresentação dos dados de forma que possam ser facilmente compreendidos. Inclui a utilização de tabelas, gráficos e medidas descritivas para descrever as características dos dados.
- Probabilidade: Estuda a incerteza e o risco associados a eventos aleatórios. Envolve o cálculo de probabilidades e a aplicação de distribuições de probabilidade para modelar fenômenos aleatórios.
- Inferência Estatística: Como mencionado anteriormente, a inferência estatística permite fazer inferências sobre uma população com base em informações obtidas de uma amostra. Isso inclui a estimação de parâmetros populacionais e o teste de hipóteses estatísticas.
- Estatística Aplicada: É a aplicação dos princípios estatísticos para resolver problemas em áreas específicas, como ciências sociais, biologia, medicina, economia, engenharia, entre outras. Envolve o uso de técnicas estatísticas





para analisar dados e obter informações relevantes em contextos práticos (Rodrigues e Lemma, 2014).

As funções de densidade são fundamentais na teoria da probabilidade e na estatística, pois descrevem a distribuição de probabilidades de uma variável aleatória contínua. Essas funções representam a densidade de probabilidade em diferentes valores da variável aleatória. Existem vários tipos de funções de densidade, cada uma adequada para descrever diferentes tipos de distribuições de probabilidade (Rodrigues e Lemma, 2014). Algumas das principais funções de densidade incluem:

- **Distribuição Normal (Gaussiana):** A distribuição normal é uma das distribuições mais comuns na estatística. Sua função de densidade é uma curva simétrica em forma de sino, caracterizada por sua média e desvio padrão. É amplamente utilizada devido à sua simplicidade e às propriedades bem conhecidas (Roe, 2001).
- **Distribuição Exponencial:** A distribuição exponencial descreve o tempo entre eventos em um processo de Poisson, onde os eventos ocorrem de forma independente a uma taxa constante ao longo do tempo. Sua função de densidade é decrescente e é frequentemente utilizada em modelagem de tempo de vida e em processos de decaimento (Walpole et al., 2012).
- **Distribuição de Weibull:** Ela é comumente aplicada em análises de confiabilidade e em estudos de vida útil de produtos. A função de densidade da distribuição de Weibull pode ser caracterizada por sua flexibilidade, permitindo modelar uma ampla variedade de fenômenos, demonstradas pelos parâmetros da técnica (Walpole et al., 2012).

A distribuição normal é uma das distribuições mais fundamentais na estatística e na probabilidade, devido à sua ampla presença em uma variedade de fenômenos naturais e processos gerados pela atividade humana. O teorema do limite central estabelece que, quando somamos muitas variáveis independentes e aleatórias, independentemente de sua distribuição original, a distribuição das somas tende a se aproximar de uma distribuição normal. Esta equação pode ser escrita matematicamente como,

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4)$$

onde x é a variável de interesse; μ é a média da distribuição; σ é o desvio padrão da distribuição; e é a base do logaritmo natural (aproximadamente 2.71828). (Roe, 2001).

A distribuição exponencial é um modelo estatístico que descreve a probabilidade de tempo até um evento ocorrer em um processo aleatório. Ela é frequentemente usada para representar o tempo entre chegadas de eventos, como o intervalo entre falhas de um componente ou o tempo entre clientes chegando a um sistema de atendimento. O principal atributo da distribuição exponencial é sua característica de "falta de memória", o que significa que a probabilidade de um evento ocorrer em um intervalo futuro não é afetada pelo tempo que já passou. Isso torna a distribuição exponencial adequada para modelar processos em que eventos independentes e aleatórios ocorrem. A função de densidade de probabilidade da distribuição exponencial pode ser escrita matematicamente como,

$$f\left(\frac{x}{\lambda}\right) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (5)$$





onde x é o tempo decorrido, λ é o parâmetro de taxa que controla a taxa média de ocorrência de eventos, e e é a base do logaritmo natural (Walpole et al., 2012).

A distribuição Weibull é empregada para lidar com problemas de confiabilidade, utilizada para modelar a vida útil de componentes e sistemas, especialmente quando a taxa de falha não é constante ao longo do tempo, sua versatilidade é a adaptação a diferentes padrões de falhas, basicamente ele interpreta condições de componentes que tendem a falhar prematuramente, apresentando uma alta taxa inicial de falha, até componentes que falham mais tarde, com uma taxa de falha que aumenta gradualmente ao longo do tempo. A equação que representa a função de Weibull, pode ser escrita como,

$$f(x, \lambda, k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (6)$$

o qual x é a variável aleatória (geralmente representando a vida útil de um componente), λ é o parâmetro de escala, que determina onde a curva da distribuição começa a subir, k é o parâmetro de forma, que influencia a inclinação da curva e, portanto, a taxa de decaimento da probabilidade à medida que x aumenta (Walpole et al., 2012).

3.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS

O planejamento de experimentos é uma ferramenta indispensável para a inovação e o aprimoramento contínuo de processos em diversos campos científicos e industriais. Esta ferramenta é considerada uma abordagem estratégica, onde cada etapa experimental é meticulosamente concebida para extrair o máximo de informações com o mínimo de recursos. Nesse processo, cada variável é cuidadosamente selecionada e manipulada, delineando um caminho preciso na busca pela compreensão dos fenômenos estudados. Através dessa metodologia, não apenas se busca validar teorias preexistentes, mas também se abre espaço para a descoberta de novos conhecimentos e a otimização de processos, impulsionando avanços significativos na ciência e na indústria. A otimização de processos representa um enfoque estratégico para maximizar a eficiência, minimizar os custos e melhorar a qualidade em uma variedade de contextos industriais e científicos. É um processo contínuo e dinâmico que envolve a análise sistemática e a melhoria de cada etapa de um procedimento ou sistema, visando alcançar resultados superiores (Rodrigues e Lemma, 2014).

A otimização de processos é conduzida através da identificação e eliminação de ineficiências, bem como da identificação e implementação de melhores práticas. Isso pode incluir a otimização de parâmetros, a redução de desperdícios, a maximização do uso de recursos e a minimização de tempo de ciclo, entre outros aspectos. Além disso, a otimização de processos muitas vezes envolve a aplicação de técnicas estatísticas e matemáticas avançadas, como o planejamento de experimentos, para entender melhor a relação entre variáveis e identificar as configurações ideais que levam aos melhores resultados (Rodrigues e Lemma, 2014).

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi desenvolvido o conceito da simulação por métodos





numéricos, que é um processo computacional que utiliza técnicas matemáticas para aproximar soluções de problemas complexos que não podem ser resolvidos de maneira analítica. Esses métodos são particularmente úteis quando as soluções exatas não podem ser obtidas devido à natureza das equações ou à complexidade dos sistemas envolvidos. Assim, envolve a discretização do problema contínuo em um conjunto de valores discretos ao longo do tempo ou espaço. Isso permite que equações diferenciais, integrais ou outras equações matemáticas sejam aproximadas por meio de cálculos iterativos.

O código desenvolvido realiza a simulação de um sistema mecânico de vibração com um rotor apoiado por dois mancais concêntricos. Ele explora o movimento do rotor ao longo do tempo e compara as respostas vibratórias para mancais com diferentes coeficientes de amortecimento. Estrutura geral do código:

- **Parâmetros do Sistema:** Define os parâmetros do sistema: a massa do rotor (m), a constante de rigidez (k), e o coeficiente de amortecimento (c).

- **Condições Iniciais:** Define as condições iniciais do sistema: deslocamento inicial (x_0) e velocidade inicial.

- **Tempo de Simulação:** Define o intervalo de tempo de simulação.

- **Simulação do Deslocamento Lateral do Eixo:** Define a equação diferencial do movimento lateral do rotor com amortecimento, considerando os mancais concêntricos. Utiliza um método de solução numérica para resolver a equação diferencial ao longo do intervalo de tempo especificado. Armazena os resultados de tempo e deslocamento com amortecimento.

- **Simulação do Sinal de Vibração dos Mancais:** Define coeficientes de amortecimento para mancais "bom" e "ruim". Resolve a equação diferencial do movimento lateral do rotor com os coeficientes de amortecimento correspondentes para os dois tipos de mancais. Armazena os resultados de tempo e deslocamento para ambos os tipos de mancais.

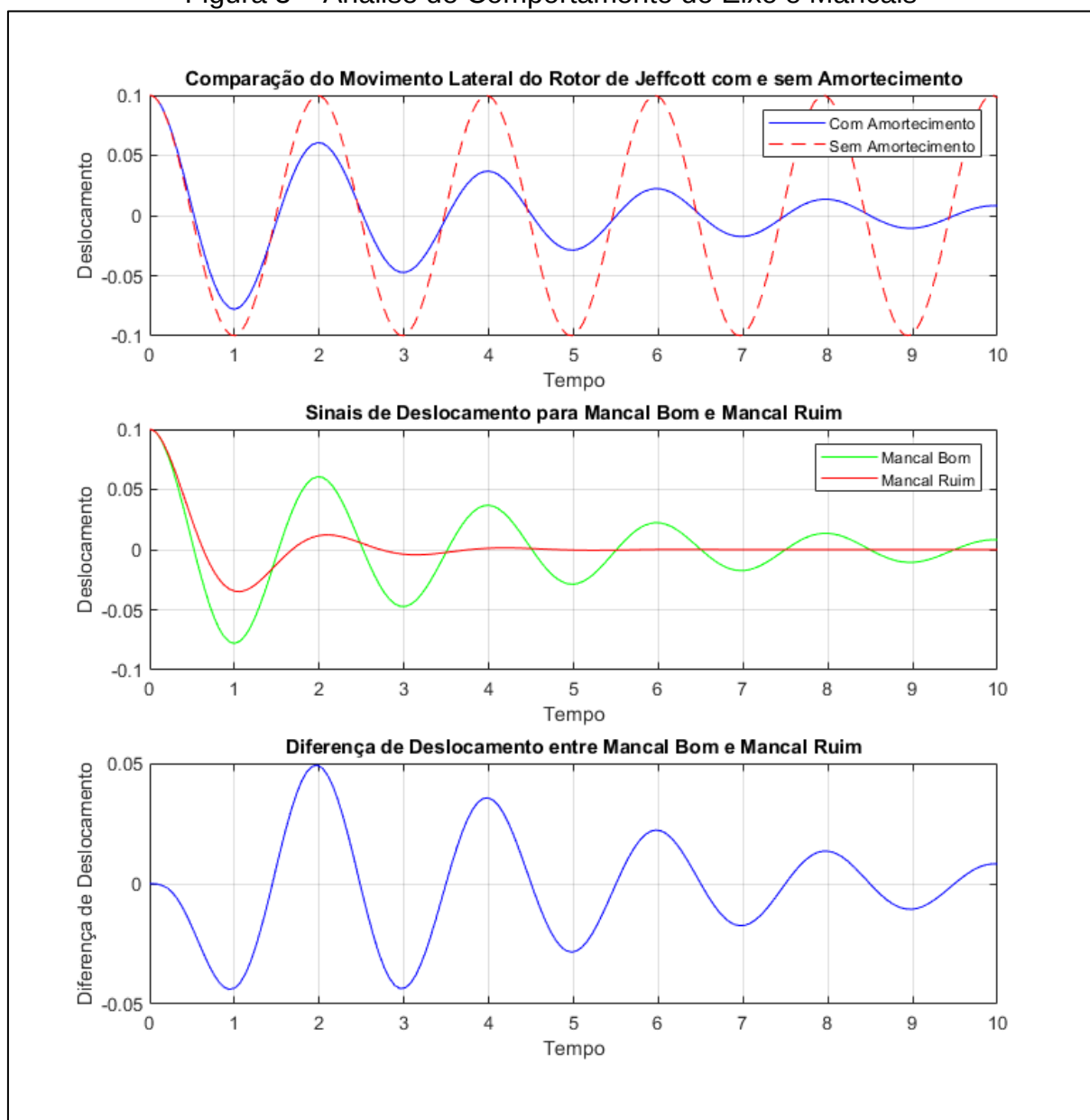
- **Plot dos Resultados:** Gera um gráfico com três subplots para visualização. Subplot1: Compara o deslocamento do rotor com e sem amortecimento ao longo do tempo. Subplot2: Exibe os sinais de deslocamento para mancais "bom" e "ruim" ao longo do tempo. Subplot3: Mostra a diferença de deslocamento entre os mancais "bom" e "ruim" ao longo do tempo.

Na figura 3 pode ser mostrada o comportamento do sinal de vibração em relação aos mancais e o efeito de deslocamento do eixo.





Figura 3 – Análise de Comportamento do Eixo e Mancais



Fonte: Desenvolvimento Próprio

Note que, no subplot 1: Comparação do Movimento Lateral do Rotor com e sem Amortecimento, ocorre a comparação do deslocamento do rotor ao longo do tempo para duas situações: com amortecimento e sem amortecimento. No eixo x, é representado o tempo e, no eixo y, o deslocamento do rotor. A linha azul representa o deslocamento com amortecimento, enquanto, a linha vermelha tracejada representa o deslocamento sem amortecimento. Isso ajuda a observar como o amortecimento afeta o movimento do rotor ao longo do tempo.

No subplot 2: Sinais de Deslocamento para Mancal Bom e Mancal Ruim, é mostrado os sinais de deslocamento do rotor para os dois tipos de mancais: "bom" e "ruim". Sendo que no eixo x, o tempo é representado, e no eixo y, o deslocamento do rotor. A linha verde representa o deslocamento para o mancal "bom", enquanto a linha





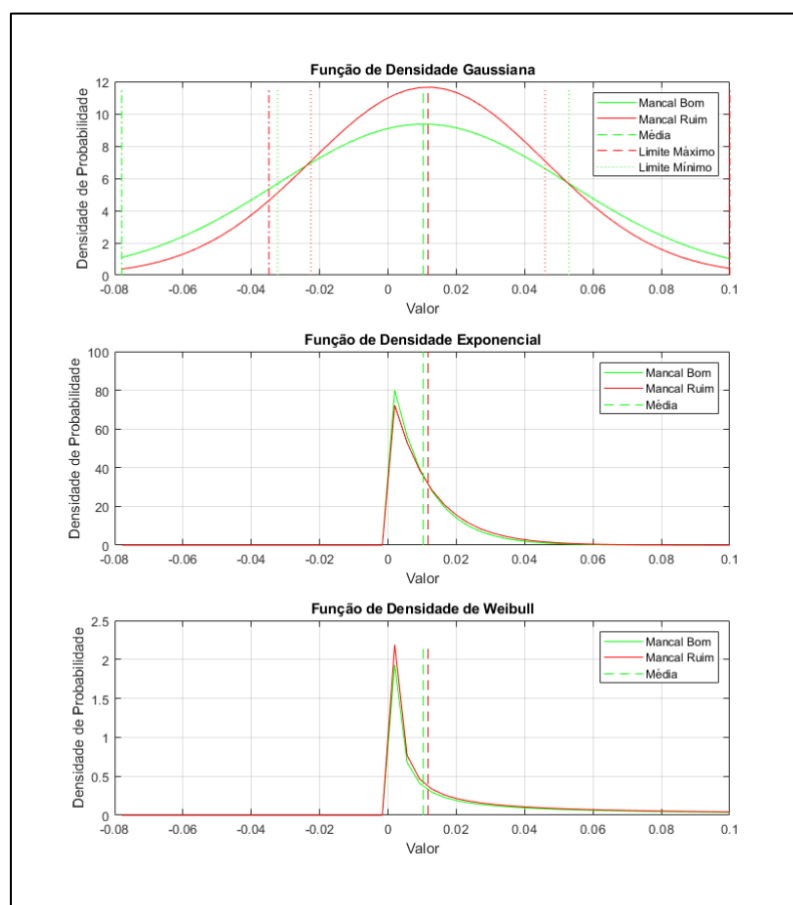
vermelha representa o deslocamento para o mancal "ruim". Esse gráfico permite comparar diretamente as vibrações do rotor entre os dois tipos de mancais.

No subplot 3: Diferença de Deslocamento entre Mancal Bom e Mancal Ruim, é mostrado a diferença de deslocamento entre o mancal "bom" e o mancal "ruim" ao longo do tempo. No eixo x, é representado o tempo, e no eixo y, a diferença de deslocamento entre os dois mancais. A linha azul representa a diferença de deslocamento. Esse gráfico destaca como a escolha do tipo de mancal afeta a vibração e a resposta do sistema.

Através de um aspecto resumido, os gráficos permitem visualizar e comparar diferentes aspectos do comportamento vibratório do sistema mecânico simulado. Eles permitem uma compreensão mais clara de como as variáveis do sistema, como amortecimento e tipo de mancal, influenciam a resposta ao longo do tempo. Isso é especialmente útil para analisar e tomar decisões informadas sobre o projeto e o desempenho de sistemas mecânicos sujeitos a vibrações.

A figura 4 mostra os métodos estatísticos aplicados na análise do sinal, considerando a função de densidade Gaussiana, Exponencial e de Weibull.

Figura 4 – Análise do Sinal por Métodos Estatísticos.



Note que, o primeiro gráfico (subplot superior) representa a função de densidade gaussiana, também conhecida como distribuição normal, é amplamente utilizada em estatísticas e probabilidade para modelar dados que são simetricamente distribuídos ao redor de uma média. No contexto da simulação de vibrações de mancais, a função de densidade gaussiana pode ser aplicada para analisar a distribuição dos deslocamentos vibracionais dos mancais "bom" e "ruim". A linha verde





representa a densidade de probabilidade estimada para os deslocamentos do mancal "bom". A linha vermelha representa a densidade de probabilidade estimada para os deslocamentos do mancal "ruim". A área sob a curva em um intervalo representa a probabilidade de um deslocamento cair dentro desse intervalo. Esse gráfico permite comparar a distribuição dos deslocamentos vibracionais entre os mancais "bom" e "ruim" e identificar diferenças na forma da distribuição e na variabilidade.

O segundo gráfico (subplot do meio) representa a função de densidade exponencial é frequentemente usada para modelar o tempo entre eventos em processos de decaimento exponencial. No contexto da simulação, essa distribuição pode ser usada para analisar a taxa de ocorrência de eventos. A linha verde representa a densidade de probabilidade estimada para os deslocamentos do mancal "bom". A linha vermelha representa a densidade de probabilidade estimada para os deslocamentos do mancal "ruim". A área sob a curva em um intervalo representa a probabilidade de um deslocamento estar dentro desse intervalo. Esse gráfico permite comparar a distribuição dos deslocamentos e entender a frequência de diferentes níveis de deslocamentos entre os mancais "bom" e "ruim".

O terceiro gráfico (subplot inferior) representa a função de densidade de Weibull que é comumente usada para modelar a distribuição de tempos de vida de sistemas sujeitos a falhas, degradação ou envelhecimento. Pode ser aplicada para entender a taxa de falha de componentes. A linha verde representa a densidade de probabilidade estimada para os deslocamentos do mancal "bom". A linha vermelha representa a densidade de probabilidade estimada para os deslocamentos do mancal "ruim". A área sob a curva em um intervalo representa a probabilidade de um deslocamento estar dentro desse intervalo. Esse gráfico permite comparar a distribuição dos deslocamentos e compreender a taxa de falha relativa entre os mancais "bom" e "ruim".

De uma certa forma os gráficos das funções de densidade proporcionam insights sobre a distribuição, frequência e comportamento dos deslocamentos vibracionais nos mancais "bom" e "ruim". Na ótica da manutenção industrial, os resultados da distribuição gaussiana podem ajudar a identificar padrões de desgaste ou falhas prematuras, possibilitando intervenções de manutenção preditiva. A distribuição exponencial auxilia a estimar a taxa de falha e a planejar ações de manutenção corretiva ou preventiva. A distribuição de Weibull fornecem informações cruciais para estabelecer estratégias de manutenção preventiva, otimizando a disponibilidade e o desempenho de sistemas. Basicamente, estas funções na manutenção industrial demonstram a capacidade de analisar, modelar e prever o comportamento de componentes e peças ao longo do tempo. Essas distribuições permitem uma abordagem mais fundamentada na tomada de decisões relacionadas à manutenção, desde o monitoramento das condições até a implementação de ações para garantir a confiabilidade e eficiência dos equipamentos industriais.

5 DISCUSSÃO GERAL

A simulação numérica de um sistema de rotor, comumente chamado de "Jeffcott rotor", pode desenvolver um estudo que analisou o comportamento vibracional de mancais "bom" e "ruim". O sistema é modelado utilizando equações diferenciais para o deslocamento lateral do eixo.

Foram considerados parâmetros como massa, constante de rigidez e coeficiente de amortecimento. O deslocamento inicial e a velocidade inicial também foram definidos. A simulação foi realizada em duas partes principais.





Na primeira parte, o deslocamento lateral do eixo foi simulado tanto com amortecimento quanto sem amortecimento. Isso permite comparar o comportamento vibracional do sistema nessas duas condições.

Na segunda parte, a simulação envolveu a vibração dos mancais "bom" e "ruim". Foram definidos coeficientes de amortecimento diferentes para esses dois cenários.

A simulação resulta nos deslocamentos ao longo do tempo para ambos os mancais, permitindo comparar a diferença vibracional entre eles. Foram ainda realizados o cálculo e plotagem das funções de densidade para analisar os dados dos deslocamentos. As funções de densidade gaussiana, exponencial e de Weibull foram utilizadas para modelar a distribuição dos deslocamentos vibracionais dos mancais. Os gráficos gerados permitem observar as características das distribuições, incluindo média, desvio padrão, limite máximo e limite mínimo, para ambos os mancais.

Na perspectiva da manutenção industrial, a simulação numérica de um sistema de rotor, desempenha um papel importante na análise e prevenção de problemas em componentes mecânicos, como mancais. Essa análise oferece uma visão detalhada do comportamento vibracional dos mancais, que são componentes fundamentais para o funcionamento adequado de máquinas e equipamentos industriais.

Os gráficos gerados que contém informações estatísticas como média, desvio padrão, limite máximo e limite mínimo, para ambos os mancais, demonstram para a manutenção industrial, identificar padrões anormais de vibração nos mancais, indicando desgaste, falhas iminentes ou outras condições adversas.

Basicamente essa análise fornece às equipes de manutenção industrial uma ferramenta poderosa para monitorar, prever e resolver problemas nos mancais e outros componentes mecânicos. Ao entender a dinâmica das vibrações e a distribuição dos deslocamentos, as equipes podem tomar decisões informadas para otimizar a manutenção, prolongar a vida útil dos equipamentos e garantir a operação segura e eficiente das instalações industriais.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho de pesquisa demonstrou em seu resultado uma análise que contribui de maneira significativa para a confiabilidade das operações industriais, permitindo tomadas de decisão informadas.

O estudo apresentado neste trabalho oferece uma análise valiosa que influencia de maneira significativa a confiabilidade das operações industriais. Ao investigar o comportamento de um eixo apoiado em dois mancais de rolamento por meio de simulação computacional, o trabalho fornece uma compreensão aprofundada das interações e desafios nesse contexto específico. Isso não só aumenta a compreensão teórica do sistema, mas também tem aplicações práticas na indústria, permitindo decisões mais informadas em relação ao projeto, manutenção e operação de equipamentos similares. Este estudo contribui para o avanço da ciência e engenharia, fornecendo conhecimentos fundamentais aplicáveis em diversos setores industriais. Além disso, sua metodologia e resultados estabelecem uma base sólida para pesquisas futuras no campo da análise de desempenho de sistemas mecânicos, abrindo caminho para avanços adicionais na confiabilidade e eficiência operacional em ambientes industriais.

Portanto, percebe-se que este trabalho pode ser considerado de sucesso, pois atende o objetivo que era investigar o comportamento de um eixo apoiado em dois mancais de rolamento, utilizando simulação computacional.





REFERÊNCIAS

- BEM-DAYA, M., DUFFUA, S.O., RAOUF, A., KNEZEVIC, J., AIT-KADI, D., **Handbook of Maintenance Management and Engineering**, Springer-Verlag London, 2009. 746 p.
- ISHIDA, Y., YAMAMOTO, T., **Linear and Nonlinear Rotordynamics: A Modern Treatment with Applications**, Wiley-VCH: Weinheim, 2012. 454p.
- KRAMER, E., **Dynamics of Rotors and Foundations**, Springer-Verlag: Berlin, 1993. 377p.
- LEES, F.P., **Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control**, 2 ed., Butterworth-Heinemann, Jordan Hill, 1996. 2727p.
- MANZINI, R.; REGATTIERI, A.; PHAM, H.; FERRARI, E.; **Maintenance for industrial Systems**, Springer-Verlag, London, 2010. 490 p.
- MAZUR, S., **Industrial Revolution 4.0: Economic Foundations and Practical Implications**, Routledge: Abingdon, 2023. 261p.
- OUTA, R., CHAVARETTE, F.R., MISHRA, V.N., GONÇALVES, A.C., ROEFERO, L.G.P., MORO, T.C., Prognosis and fail detection in a dynamic rotor using artificial immunological system, **Engineering Computations**, v.39, n.9, 3127-3145p., 2020. DOI: <https://doi.org/10.1108/EC-08-2019-0351>.
- OUTA, R., **SUPRESSÃO DO MOVIMENTO CAÔTICO DE UM ROTOR DINÂMICO UTILIZANDO O CONTROLE LINEAR ÓTIMO**. 2017.122P. Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) – Mecânica dos Sólidos, Ilha Solteira, 2017.
- POPKOVA, E.G., RAGULINA, Y.V., BOGOVIZ, A.V., **Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century**, Springer International: Switzerland, 2019. 249p.
- PUIG, V., SIMANI, S., **Diagnosis and Fault-tolerant Control 1: Data-driven and Model-based Fault Diagnosis Techniques**, ISTE: Great Britain, 2021. 269p.
- RODRIGUES, M. I., LEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. Editora Carita, Campinas, 2014. 358p.
- ROE, B.P., **Probability and Statistics In Experimental Physics**, Springer-Verlag New York, 2001. 262p.
- TELES, J., **Bíblia do RCM: O guia completo e definitivo da manutenção centrada na confiabilidade na era da indústria 4.0**, Engeteles Editora, Brasília, 2019. 391p.
- VANCE, J., ZEIDAN, F., MURPHY, B., **Machinery Vibration And Rotordynamics**, John Wiley: Hoboken, 2010. 419p.
- WALPOLE, R.E., MYERS, R.H., MYERS, S.L., **Probability & Statistics for Engineers & Scientists**, 9 ed., Pearson Education: Boston, 2012. 812p.
- WITANOWSKI, L., KLONOWICZ, P., LAMPART, P., KLIMASZEWSKI, P., SUCHOCKI, T., JĘDRZEJEWSKI, L., ZANIEWSKI, D., ZIÓŁKOWSKI, P., Impact of rotor geometry optimization on the off-design ORC turbine performance, **Energy**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126312>.
- YOON, S.Y., LIN, Z., ALLAIRE, P.E., **Control of Surge In Centrifugal Compressors By Active Magnetic Bearings, Theory and Implementation**, Springer London Heidelberg New York Dordrecht, Springer-Verlag London 2013. 292. p.

