

JOÃO VITOR BARBOSA ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA ANÁLISE
CORRETIVA DE EQUIPAMENTOS DE SUCCÃO EM INDÚSTRIA
DE GRANDE PORTE - APLICAÇÃO NA CONFIABILIDADE E
MELHORIA CONTINUA DOS PROCESSOS DE MANUTENÇÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2024

JOÃO VITOR BARBOSA ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA ANÁLISE
CORRETIVA DE EQUIPAMENTOS DE SUÇÃO EM INDÚSTRIA
DE GRANDE PORTE - APLICAÇÃO NA CONFIABILIDADE E
MELHORIA CONTINUA DOS PROCESSOS DE MANUTENÇÃO**

Projeto de Fim de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Uberlândia

2024

JOAO VITOR BARBOSA ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA ANÁLISE
CORRETIVA DE EQUIPAMENTOS DE SUCCÃO EM INDÚSTRIA
DE GRANDE PORTE - APLICAÇÃO NA CONFIABILIDADE E
MELHORIA CONTINUA DOS PROCESSOS DE MANUTENÇÃO**

Projeto de Fim de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Prof. Dr. Luciano José Arantes

Mestre Felipe Chagas Rodrigues de Souza

Uberlândia, 26 de Julho de 2024.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa a conclusão da minha graduação, que só foi possível graças ao apoio incondicional dos meus pais, Nilson e Vera. Eles foram exemplos de força e dedicação desde o início, inspirando-me a sempre dar o meu melhor e a nunca desistir, independentemente das dificuldades. O incentivo aos estudos e a confiança no meu sonho de me formar em uma Universidade Federal foram frutos desse apoio.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus amigos Alfredo e Advânia. Eles me ajudaram imensamente ao longo da graduação, tanto na conclusão das disciplinas quanto na participação em vários projetos de extensão. Além disso, tornaram esse percurso muito mais leve e agradável..

Minha gratidão também vai para minha amiga Rayssa, que me auxiliou durante os estágios, facilitando minha entrada no ambiente de trabalho até minha efetivação na empresa onde este projeto foi desenvolvido.

Agradeço ao meu coordenador Caique, aos representantes da Makpan, Jaime e Marcelo, e aos representantes da SKF, Rodrigo e Deivid, que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço ao meu orientador Leonardo por seu constante apoio ao longo de todo o projeto de fim de curso, sempre estando aberto às ideias sugeridas.

Por fim, agradeço à minha amada Ester, que me apoiou e incentivou na reta final da graduação, estando ao meu lado em todos os desafios.

BARBOSA, J. V. **Estudo de caso: desenvolvimento de uma bancada para análise e balanceamento de equipamentos de sucção - aplicação na confiabilidade e melhoria contínua dos processos de manutenção.** 2024. 46 folhas. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

RESUMO

O uso da análise de vibração como técnica preditiva apresenta diversas vantagens na determinação da condição de equipamentos industriais. No conceito de Indústria 4.0, por meio de sensores de vibração, os equipamentos podem ser monitorados em tempo real, garantindo assim um histórico operacional do ativo e ajudando a prevenir a falha de uma máquina ou de determinadas peças mecânicas, como ventiladores industriais. Os ventiladores são dispositivos extremamente fundamentais em conjuntos mecânicos, sendo responsáveis por manter temperaturas estáveis, garantir o fluxo de ar adequado e gerenciar as condições térmicas de componentes delicados em diferentes indústrias. No entanto, o desempenho e a confiabilidade dos ventiladores industriais podem ser afetados por vários fatores, incluindo vibrações, problemas de manutenção e desafios operacionais. Os critérios da norma ISO 10816 são um importante apoio para a caracterização do estado atual da máquina, sendo ela amplamente utilizada para tomadas de decisões sobre a troca ou não do componente. No presente trabalho, por meio da técnica de manutenção preditiva de análise de vibração, seguido a norma NBR 10082 avaliou-se um rolamento autocompensador de esferas, comparando-se as condições de vibração deste elemento com a a norma de vibração ISO 10816. Após a troca recorrente do ventilador com falha, observou-se uma um reduziu a confiabilidade de 85 % para 39 % ao longo de três meses, e aumentou a taxa de previsão de falhas de 0,5 para 1,6. Com a contramedida desenvolvido para recuperação dos ventiladores a confiabilidade aumentou de 39% ao longo de três meses, e reduziu a taxa de previsão de falhas de 1,6 para 1,1.

Palavras-chave: Manutenção; Confiabilidade; Vibração; Ventiladores industriais; Melhoria de desempenho.

BARBOSA, J. V. Case study: development of a bench for analyzing and balancing suction equipment - application in reliability and continuous improvement of maintenance processes. 2024. 48 pages. Final Paper (Graduation in Mechatronics Engineering) – Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2024.

ABSTRACT

Vibration analysis as a predictive technique offers several advantages in determining the condition of industrial equipment. Within the concept of Industry 4.0, vibration sensors enable real-time equipment monitoring, thereby ensuring an operational history of the asset and helping to prevent the failure of machines or specific mechanical components, such as industrial fans. Fans are crucial mechanical assembly devices responsible for maintaining stable temperatures, ensuring adequate airflow, and managing the thermal conditions of delicate components in various industries. However, the performance and reliability of industrial fans can be affected by multiple factors, including vibrations, maintenance issues, and operational challenges. The criteria set by ISO 10816 provide significant support in characterizing the current state of the machine and are widely used for decision-making regarding the replacement of components. In the present study, using the predictive maintenance technique of vibration analysis by NBR 10082, a self-aligning ball bearing was evaluated, comparing its vibration conditions with the ISO 10816 vibration standard. Following the replacement of the faulty fan, it was observed that reliability decreased from 85 % to 39 % over three months, and the failure prediction rate increased from 0.5 to 1.6.

Keywords: Maintenance; Reliability; Vibration; Industrial fans; Performance improvement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de banheira (Selitto, 2005).....	20
Figura 2. Ventilador da Tecnologia Max.	30
Figura 3. Pontos de coleta na Tecnologia Max.	31
Figura 4. Exemplo de uma análise preditiva do equipamento ventilador do Max.....	32
Figura 5. Correia de três canais com uma tensão de 60 Hz.	33
Figura 6. Polias de 12 canais que permitem o uso de apenas uma correia com uma tensão aplicada entre 35 e 40 Hz.	34
Figura 7. Gaiola da bancada de balanceamento.	35
Figura 8. Bancada de balanceamento.....	36
Figura 9. Equipamento para coleta dos dados.....	36
Figura 10. Checklist de manutenção de ventiladores.....	37
Figura 11. Tabela de tolerâncias.	38
Figura 12. Certificado de balanceamento.....	39
Figura 13. Confiabilidade Novembro 2023.	40
Figura 14. Confiabilidade Fevereiro 2024.	40
Figura 15. Confiabilidade Junho 2024.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Informações dos níveis de vibração da ISO 1816 - Classe de equipamento (Adaptado de ISO 1816).	22
Tabela 2. Distribuição da norma ISO 10816.	23
Tabela 3. Parâmetros para avaliação da vibração de equipamentos (NBR - 10082, 2011).	24

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
IA	Inteligência Artificial
IoT	Internet das Coisas
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
PPH	Processo de Poisson Homogêneo
PPNH	Processo de Poisson Não-Homogêneo
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
TPM	Manutenção Produtiva Total

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo geral	14
1.1.1. Objetivos específicos	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1. INDÚSTRIA 4.0	15
2.2. CRITÉRIO DE ANÁLISE DE FALHA	16
2.3. MÉTODOS DE ANÁLISE DE FALHA	17
2.4. MÉTODOS DE CÁLCULOS DE CONFIABILIDADE	18
2.4.1 Cálculo de Manutenibilidade.....	21
2.5. NORMA ISO 10816.....	22
2.6. NORMA NBR 10082	23
2.7. CONFIABILIDADE EM SISTEMAS REPARÁVEIS	25
2.7.1. Confiabilidade em ventiladores industriais.....	25
3. METODOLOGIA	28
3.1. TIPOLOGIA DA PESQUISA.....	28
3.2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	29
3.3. ESTUDO DE CASO	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. INFORMAÇÕES PREDITIVAS	33
4.2. PROCESSO DE RECUPERAÇÃO	34
5. CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

Ventiladores industriais são componentes cruciais em diversas aplicações, incluindo ventilação, resfriamento e circulação de ar em ambientes industriais, comerciais e residenciais (Andreica, 2023). Esses ventiladores são essenciais para manter temperaturas estáveis, garantir o fluxo de ar adequado e gerenciar as condições térmicas de componentes delicados em diferentes indústrias.

No entanto, o desempenho e a confiabilidade dos ventiladores industriais podem ser afetados por vários fatores, incluindo vibrações, problemas de manutenção e desafios operacionais. As vibrações em ventiladores industriais podem ter implicações significativas no seu desempenho. Altos níveis de vibração em ventiladores, especialmente em ventiladores de tiragem induzida, podem levar a problemas como falha do impulsor e até mesmo quebra completa do sistema ventilador-motor (Sarita et al., 2022). O monitoramento e a análise de vibrações em ventiladores industriais são cruciais para a detecção precoce de falhas e o planejamento de manutenção para evitar falhas inesperadas e garantir um desempenho ideal (Oyekan et al., 2020; Sharrar e Danapalasingam, 2022).

Assim, a confiabilidade é um aspecto crucial dos ventiladores industriais, pois impacta diretamente seu desempenho, eficiência e eficácia operacional geral. A confiabilidade dos ventiladores industriais refere-se à sua capacidade de operar consistentemente conforme pretendido sob condições especificadas, garantindo funcionalidade contínua e sem problemas em aplicações industriais (Benamira et al., 2022; Tabet et al., 2023).

Garantir a confiabilidade dos ventiladores industriais é essencial para manter operações ininterruptas em diversos setores. Por exemplo, na indústria de energia elétrica, a confiabilidade é crucial para que os sistemas de energia desempenhem as funções exigidas sob condições específicas, enfatizando a importância da operação confiável dos ventiladores no suporte de funções essenciais (Nowotarski e Weron, 2018). Da mesma forma, em indústrias onde são utilizados sistemas eletromecânicos como ventiladores, a confiabilidade e a disponibilidade são fatores-chave para garantir uma operação contínua e sem problemas (Benamira et al., 2022).

Segundo o mesmo autor, a confiabilidade dos ventiladores industriais está intimamente ligada aos seus processos de manutenção e detecção de falhas. Técnicas de manutenção preditiva, como o diagnóstico de falhas baseado no monitoramento das correntes do estator em motores de indução, desempenham um papel vital para garantir a alta confiabilidade dos ventiladores, detectando e abordando desequilíbrios mecânicos e elétricos precocemente. Ao implementar

sistemas confiáveis de monitoramento de condições e estratégias de manutenção preditiva, o risco de quebras ou falhas repentinas em sistemas de ventiladores industriais pode ser minimizado (Sarita et al., 2022).

Além disso, o design e a otimização dos ventiladores industriais também contribuem para a sua confiabilidade. Técnicas avançadas de projeto, como otimização do impulsor e modificações aerodinâmicas, podem aumentar a eficiência e a confiabilidade do ventilador, reduzindo o consumo de energia e melhorando o desempenho (Lee et al., 2011). Além disso, o uso de materiais confiáveis, como mancais de deslizamento projetados para aplicações de baixa velocidade, pode aumentar ainda mais a confiabilidade dos ventiladores industriais, especialmente em ambientes operacionais exigentes, como fábricas de cimento (Singhal, 2008).

Dessa forma, a confiabilidade dos ventiladores industriais é crucial para garantir uma operação contínua e sem problemas em ambientes industriais. Ao focar na manutenção preditiva, na otimização avançada do projeto e no uso de componentes confiáveis, os ventiladores industriais podem manter altos níveis de confiabilidade, contribuindo para processos industriais eficientes e ininterruptos.

1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem por objetivo geral é o desenvolvimento de uma bancada para análise corretiva de equipamentos de sucção em indústria de tabaco localizada em Uberlândia, visando aumentar a confiabilidade do equipamento.

1.1.1. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, esta pesquisa possui os seguintes objetivos específicos:

- Análise da confiabilidade do ventilador de sucção durante um período de 1 ano
- Desenvolvimento de uma bancada para manutenção preventiva de ventiladores industriais utilizados na empresa X;
- Aplicação na confiabilidade e melhoria contínua dos processos de manutenção.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos que norteiam o tema da pesquisa, com intuito de embasar o estudo e facilitar sua compreensão e apoio as conclusões. Inicialmente são apresentados conceitos sobre a indústria 4.0 e suas tecnologias, e fornece uma contextualização mais específica em relação aos tipos de manutenção, critérios de análise de falha e confiabilidade em sistemas reparáveis, tema que norteia esta pesquisa.

2.1. INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 representa a quarta revolução industrial, caracterizada pela integração de tecnologias digitais avançadas nos processos de produção. Esta integração inclui a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, big data, computação em nuvem e outras inovações para otimizar a produção, melhorar a eficiência e permitir a personalização de produtos em massa (Ciani et al., 2021).

No contexto da Indústria 4.0, a geração de contramedidas em manutenção tem evoluído de paradigmas focados em planejamento para abordagens mais proativas. Reconhecendo as vantagens da Manutenção Preditiva, várias ideias baseadas em tecnologias-chave da Indústria 4.0, como IIoT, têm sido propostas na literatura recente (Patil et al., 2021; He et al., 2018).

A implementação de estratégias de manutenção eficazes é essencial para garantir a confiabilidade e a eficiência dos equipamentos industriais. A Manutenção Produtiva Total (TPM) é uma abordagem abrangente que visa maximizar a eficiência dos equipamentos, enquanto a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) ou RCM (*Reliability Centered Maintenance*) é uma metodologia sistemática para determinar os requisitos de manutenção preventiva com base na criticidade dos componentes (Jain et al., 2015; Firdaus et al., 2023).

A TPM é uma abordagem abrangente à gestão da manutenção que visa maximizar a eficiência dos equipamentos, envolvendo todos os colaboradores da empresa na manutenção preventiva e na melhoria contínua dos processos. O TPM visa eliminar perdas, defeitos e quebras, promovendo manutenção autônoma, manutenção planejada e melhoria geral da eficácia do equipamento (Braglia et al., 2019).

A MCC é uma metodologia sistemática para determinar os requisitos de manutenção preventiva dos equipamentos para otimizar o sistema de manutenção. O MCC prioriza a manutenção com base na criticidade dos componentes, considerando a segurança, o impacto operacional e os custos associados a falhas. Esta abordagem visa garantir a confiabilidade dos ativos de forma eficiente e eficaz (Fang et al., 2019).

A integração da Indústria 4.0 com a MCC foi reconhecida como uma estratégia transformadora, apesar dos potenciais desafios na adaptação e resistência da força de trabalho. A MCC é uma das estratégias de manutenção mais contemporâneas, amplamente aplicada em diversas atividades industriais para manter a funcionalidade dos processos e ativos físicos, identificando e corrigindo falhas de forma eficaz (Jena, 2023; Endo e Hozumi, 2021).

Portanto, combinar a Indústria 4.0 com TPM e MCC pode levar a operações industriais mais eficientes, confiáveis e sustentáveis, aproveitando os benefícios da digitalização, manutenção proativa e otimização dos processos de manutenção para garantir excelência operacional e competitividade no mercado.

2.2. CRITÉRIO DE ANÁLISE DE FALHA

Existem diferentes tipos de manutenção que são essenciais para garantir a operacionalidade e a confiabilidade dos equipamentos e sistemas. Os principais tipos de manutenção incluem:

- **Manutenção preventiva:** Consiste na realização de inspeções, testes e intervenções programadas com base em intervalos de tempo ou critérios pré-estabelecidos para evitar falhas e garantir a operação contínua dos equipamentos. A manutenção preventiva pode ser dividida em manutenção preventiva baseada no tempo e manutenção preventiva baseada em condição (Obradović et al., 2023; Tarakci, 2015).

- **Manutenção corretiva:** Realizada após a ocorrência de uma falha ou quebra no equipamento, com o objetivo de restaurar sua funcionalidade. Pode ser dividida em manutenção corretiva planejada, quando a intervenção é programada após a identificação da falha, e manutenção corretiva não planejada, que ocorre de forma reativa após a falha inesperada (Gyamfi e Zigah, 2023; Jørgensen, 1995).

- **Manutenção preditiva:** Baseada no monitoramento contínuo das condições dos equipamentos por meio de sensores e tecnologias de monitoramento para prever possíveis falhas e agendar intervenções apenas quando necessário. Isso ajuda a evitar paradas não

programadas e reduzir custos de manutenção (Dash et al., 2021).

- **Manutenção detectiva:** Realizada por meio da identificação de sinais de degradação ou falhas iminentes nos equipamentos, permitindo a intervenção antes que ocorra uma falha completa. É uma abordagem proativa que visa identificar problemas incipientes (Li e Wen, 2022).

- **Manutenção autônoma:** Envolve a capacitação dos operadores para realizar atividades de manutenção de rotina, inspeções e pequenas intervenções nos equipamentos em seus próprios postos de trabalho. Isso contribui para a prevenção de falhas e a melhoria da eficiência operacional.

A combinação dessas contramedidas pode ajudar a mitigar as falhas a nível de componente, melhorar a confiabilidade dos sistemas e aumentar a eficiência da manutenção.

2.3. MÉTODOS DE ANÁLISE DE FALHA

Os métodos de análise de falha desempenham um papel fundamental na identificação e prevenção de falhas em sistemas e equipamentos. Diversas abordagens e técnicas são empregues para analisar as causas raiz das falhas e desenvolver contramedidas eficazes. Alguns dos métodos de análise de falha mais comuns incluem:

- **Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis*):** Um método sistemático para identificar potenciais modos de falha em um sistema, avaliar os efeitos dessas falhas e desenvolver ações corretivas para mitigar os riscos associados (Peeters et al., 2018; Wang et al., 2022).

- **Análise de Árvore de Falhas (FTA – *Fault Tree Analysis*):** Uma técnica que modela graficamente as possíveis sequências de eventos que podem levar a uma falha em um sistema, permitindo a identificação das causas principais das falhas (Peeters et al., 2018).

- **Análise de Propagação de Falhas:** Foca em como as falhas se propagam em um sistema e como podem ser eliminadas ou mitigadas (Wang et al., 2017).

- **Análise de Sensibilidade:** Utilizada para identificar quais parâmetros são mais críticos em relação às falhas e como essas falhas podem ser afetadas (Leavy et al., 2023).

- **Análise de Causa Raiz:** Um método abrangente para identificar a causa fundamental de uma falha, permitindo a implementação de ações corretivas eficazes

(Febriyanti et al., 2023).

- **Análise de Competição de Falhas:** Concentra-se na análise de sistemas sujeitos a múltiplas falhas concorrentes, avaliando como essas falhas interagem e impactam o sistema (Xing et al., 2012).

- **Análise Estatística:** Envolve o uso de métodos estatísticos para analisar padrões de falha, identificar tendências e prever possíveis falhas futuras (Singh e Tan, 2021).

- **Análise de Risco:** Utilizada para avaliar os riscos associados a falhas em sistemas e equipamentos, permitindo a implementação de medidas preventivas adequadas (Zhu et al., 2019; Petrovskiy et al., 2015).

Esses métodos de análise de falha desempenham um papel crucial na manutenção preventiva, na melhoria da confiabilidade dos sistemas e na redução de custos associados a falhas inesperadas. A escolha do método mais apropriado depende da natureza do sistema, das características da falha e dos objetivos da análise.

2.4. MÉTODOS DE CÁLCULOS DE CONFIABILIDADE

Os modelos de confiabilidade desempenham um papel fundamental na análise e previsão de falhas em sistemas e processos. Os modelos de confiabilidade são fundamentais para entender o comportamento de falhas de um sistema ou componente e para tomar decisões sobre manutenção e melhoria de projeto (Rausand, 2004).

Alguns modelos comuns incluem modelos baseados em processos de Poisson e modelos de tempo até falha. Os modelos de processos de Poisson são frequentemente usados para representar a ocorrência de eventos ao longo do tempo, como chegadas em sistemas de filas, falhas de equipamentos ou eventos em processos de telecomunicações. Esses modelos são caracterizados pela distribuição de Poisson, que descreve a probabilidade de um número específico de eventos ocorrerem em um intervalo de tempo fixo, assumindo uma taxa média de ocorrência constante (Paxson e Floyd, 1995; Faÿ et al., 2006; Tang e Dai, 2015).

Um dos processos mais utilizados para a modelagem de confiabilidade de sistemas usando processos de contagem de falha é o Processo de Poisson. Esse modelo leva em consideração as falhas do sistema e em que tempo t da vida do sistema ela ocorre. Caso for observada uma periodicidade nos tempos de falha do sistema, usa-se o Processo de Poisson Homogêneo (PPH), caso contrário, ou seja, se há uma tendência de mudança na intensidade de falha em relação à idade do sistema, o Processo de Poisson Não-

Homogêneo (PPNH) é utilizado. Um dos principais modelos de confiabilidade em sistemas reparáveis é obtido usando PPNH com função de intensidade de falha Weibull (Fraga e Pinto, 2013).

Por outro lado, modelos de tempo até a falha são empregados para analisar a distribuição dos tempos decorridos até que ocorram falhas em sistemas ou equipamentos. Esses modelos são essenciais para prever a vida útil dos componentes, estimar a confiabilidade do sistema e planejar atividades de manutenção preventiva. Podem ser baseadas em distribuições como exponencial, Weibull ou outras distribuições de tempo até falha, dependendo das características do sistema (Huddleston, 2004; Ballani et al., 2007).

Em resumo, o Processo de Weibull Poisson é um PPNH com função de intensidade que segue uma distribuição de Weibull. Ele é utilizado para análises de confiabilidade em sistemas reparáveis devido à função de intensidade permitir mudanças ou tendências na intensidade de falha de acordo com o tempo de vida t do sistema conforme a Eq. (1).

$$u(t) = \gamma \cdot \beta \cdot t^{\beta-1} \quad (1)$$

No contexto do PPNH, a função de intensidade $u(t)$ é dependente da idade t do sistema. O sistema pode manifestar uma etapa de aprimoramento quando $\beta > 1$, na qual a função de intensidade decresce com $\beta < 1$, uma fase estável, na qual a função de intensidade permanece constante com $\beta = 1$, ou uma fase de deterioração do sistema, em que a função de intensidade aumenta (Crow, 1993).

Se o sistema estudado é reparável e as falhas que impactam o sistema seguem um Processo de Weibull-Poisson, a probabilidade de que um sistema com idade t não falhe no intervalo $(t, t + \Delta t)$ é dada pela Eq. (2).

$$R(t) = e^{-[\gamma(t+\Delta t)^\beta - \gamma \cdot t^\beta]} \quad (2)$$

Para Crow (1975), para processo de estruturação da confiabilidade de um sistema desse tipo, deve ser empregado um procedimento que leva em consideração o número k de componentes do sistema e cada um com seu respectivo tempo de operação até um tempo T máximo de funcionamento do sistema. Aqui, N_q é considerado como o número de falhas de cada componente, onde $N = \sum_{q=1}^k N_q$.

$$\gamma = \frac{N}{k \cdot T^\beta} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{N}{\sum_{q=1}^k \sum_{i=1}^{N_q} \ln \frac{T}{X_{iq}}} \quad (4)$$

As falhas apresentam padrões comportamentais que podem ser categorizados de acordo com o fator de forma: (i) para $\gamma < 1$, a taxa de falhas está em declínio, indicativo de mortalidade infantil; (ii) $\gamma = 1$ representa uma taxa de falhas constante, sugerindo a ocorrência de falhas aleatórias ou a fase de maturidade; e (iii) para $\gamma > 1$, a taxa de falhas está em crescimento, denotando falha por fadiga ou mortalidade senil do componente (Sellitto, 2005).

A escolha do modelo mais adequado depende da natureza do sistema, dos dados disponíveis e dos objetivos da análise. A utilização de modelos de confiabilidade adequados é crucial para garantir o funcionamento seguro e eficiente de sistemas em diversas áreas, desde telecomunicações e computação até engenharia e ciências ambientais.

A Curva da Banheira é uma forma genérica de visualização gráfica da função risco $h(t)$ que identifica as três fases do ciclo de vida de um item: mortalidade infantil, maturidade, e mortalidade senil (Klutke et al., 2003), respectivamente conforme representado na Fig. 1.

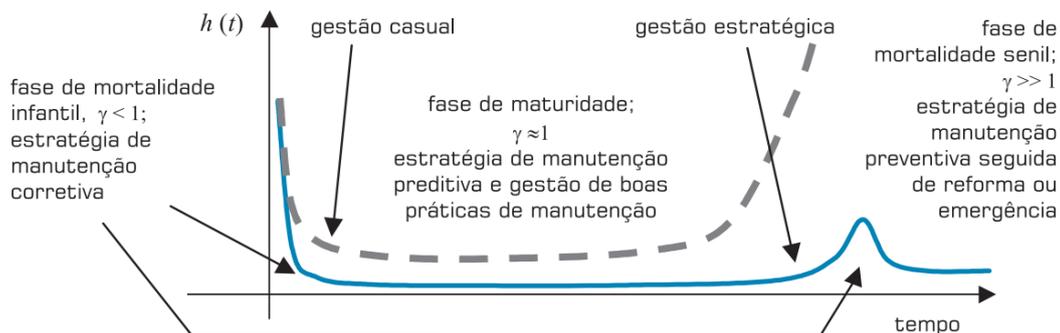


Figura 1. Curva de banheira (Selitto, 2005).

O período de "mortalidade infantil" é caracterizado como o momento inicial após a instalação de um novo equipamento, quando as falhas são mais prováveis. Essas falhas

geralmente se originam de defeitos de fabricação, erros de instalação ou outros problemas iniciais. O período de "maturidade" representa a fase mais longa, durante a qual a taxa de falhas é relativamente constante e baixa. Durante este período, o sistema ou componente está normalmente em operação conforme o esperado (Jardine; Tsang, 2013).

Como a taxa de falhas média e a função risco são constantes e a melhor estratégia de manutenção é a manutenção preditiva, para garantir que não se iniciou a fase de desgaste, acompanhada de um programa de boas práticas operacionais, tais como na TPM. Na mortalidade senil ou período de desgaste, a taxa de falhas cresce devido ao fim da vida útil do item, causada por envelhecimento, desgaste, corrosão, ou processos do gênero. A estratégia de manutenção mais indicada para esta fase é a preventiva, se possível acompanhada de reforma (Sellitto, 2005).

Por fim, o período de "mortalidade senil" corresponde ao final do ciclo de vida de um componente, momento no qual a taxa de falha começa a aumentar devido ao envelhecimento e ao desgaste do material (Jardine; Tsang, 2013).

2.4.1 Cálculo de Manutenibilidade

A função de manutenibilidade $M(t)$, análoga à função de confiabilidade $R(t)$, oferece uma importante perspectiva adicional na gestão de manutenção: ela considera o tempo até o reparo em vez do tempo até a falha. Este enfoque é expresso na métrica conhecida como MTTR (*Mean Time To Repair* - Tempo Médio Até o Reparo), um índice de desempenho que reflete a eficiência de operações de manutenção, sendo expresso por:

$$MTTR = \frac{\text{Tempo de parada}}{\text{Número de paradas}} \quad (5)$$

O MTBF e a função de confiabilidade $R(t)$ são combinados para formar um indicador abrangente de desempenho do sistema, a disponibilidade. O MTBF expressa a soma de tempo indisponível para operação dividido pelo número total de intervenções da manutenção quer corretiva quer preventiva, pela Eq. (6):

$$MTBF = \frac{\text{Tempo disponível} + \text{Tempo de parada}}{\text{Número de paradas}} \quad (6)$$

De modo análogo à confiabilidade e ao MTBF, o valor médio dos tempos até o reparo é o MTTR. Combinando os MTBF e MTTR, pode-se calcular a disponibilidade $A_v(t)$ de um item, ou seja, a probabilidade de um item estar disponível quando solicitado. A $A_v(t)$ é dada pela Eq. 7 (Fogliatto e Ribeiro, 2009).

$$A(t) = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (7)$$

2.5. NORMA ISO 10816

A norma ISO 10816 surge como uma principal referência para utilização de comparação de valores de velocidade RMS com a literatura. Através da norma é possível obter a condição atual do ativo, servindo como referência para obtenção de níveis permissíveis de vibração e alarme (Wais, 2022).

A análise dos dados de manutenção preditiva está diretamente relacionada ao monitoramento dos níveis de vibração de equipamentos de grande porte, conforme especificado pela norma ISO 10816. A norma ISO 10816 indica que uma amplitude de velocidade, $V_{\text{RMS}} = 1,8 \text{ mm/s}$, será o limite máximo de detecção de um dano para a máquina da classe I (referente ao motor).

Essa norma estabelece os critérios para a avaliação das condições de operação e a detecção precoce de falhas potenciais. A norma ISO 10816 é dividida em 9 subpartes para avaliação de cada tipo de máquina, a parte 3 da ISO trata a respeito da avaliação em máquinas críticas com mais de 15 kW e com rotação maior de 500 rpm. A norma é um documento fundamental para um critério de mensuração da elevação dos níveis de vibração para os elementos não rotativos. Conforme Tabela 1, é possível observar os níveis de vibração que indicam o estado do equipamento, onde:

- A – Normal;
- B – Alerta;
- C – Alarme;
- D – Emergência;

Tabela 1. Informações dos níveis de vibração da ISO 1816 - Classe de equipamento (Adaptado de ISO

1816).

R.m.s (mm/s)	Classe I Máq. Pequena	Classe II Máq. Média	Máquinas Grandes	
			Classe II fundação rígida	Classe IV fundação flexível
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	A
1,8				
2,8	C	C	C	B
4,5				
7,1	D	D	C	C
11,2				
18			D	D
28				
45				

Zona A Verde: Valores de vibração operacionais.
Zona B Amarelo: Operação contínua sem restrições
Zona C Laranja: Condição é aceitável apenas por um período limitado.
Zona D vermelha: Valores de vibração perigosos – Falha iminente

Outras partes da norma ISO 10816 dizem a respeito de outros tipos de equipamentos passíveis de valores orientativos, que podem ser vistos na Tab. 2:

Tabela 2. Distribuição da norma ISO 10816.

Norma	Aplicação
ISO 10816-1	Máquinas em geral
ISO 10816-2	Turbinas de vapor e geradores
ISO 10816-3	Máquinas críticas
ISO 10816-4	Turbinas a gás
ISO 10816-5	Turbinas hidráulicas
ISO 10816-6	Máquinas de pistões alternativos
ISO 10816-7	Bombas
ISO 10816-8	Compressores
ISO 10816-21	Turbinas eólicas
ISO 10816-1	Máquinas em geral

A norma ISO 10816-3, recentemente em outubro de 2022 passou por uma atualização, a nova ISO 20816-3 tem aplicação em equipamentos com potência acima de 15 kW e rotação de 120 rpm até 30.000 RPM.

2.6. NORMA NBR 10082

A implementação de um regime de análise de vibração consiste na realização de inspeções periódicas que geram dados, coletados por um acelerômetro, a ser analisados por um software com espectro de frequências, que são distinguidas pela amplitude. Após

análise do software, o diagnóstico de funcionamento se suporta na norma NBR 10082 (2011).

Tendo como configuração básica realizar-se a medição de 10 Hz a 1000 Hz [RMS] para avaliação segundo a norma NBR-10082.

- **Medições de Aceleração:** É utilizada para detecção de falhas que ocorrem em alta frequência tais como: engrenamento, rolamentos, pulsação de fluídos em alta frequência.

- **Medições de Envelope de Aceleração:** É utilizada para identificar falhas mecânicas que geram choques, mesmo que de baixa energia. Aplicada em falhas em rolamentos e engrenamentos, possibilita o aumento qualitativo da confiabilidade dos espectros de velocidade de vibração e aceleração culminando em um melhor laudo técnico.

- **Normas técnicas.**

Os equipamentos foram avaliados segundo a norma NBR-10082(2011), sendo as máquinas classificadas do seguinte modo:

Tabela 3. Parâmetros para avaliação da vibração de equipamentos (NBR - 10082, 2011).

Limite das zonas	Zona	Avaliação	Velocidade [R.M.S] mm/s				Status infravermelho
			Grupo 2 15 kW a 300 kW	Grupo 4 Acima de 15 kW acionamento integrado	Grupo 1 300 kW a 500 MW	Grupo 3 Acima de 15 kW acionamento separado	
			Base		Base		
			Rígido	Flexível	Rígido	Fléxivel	
	A	Bom					
A/B			1,4	2,3	2,3	3,5	N
	B	Aceitável					
B/C			2,8	4,5	4,5	7,1	A1
	C	Insatisfatório					
C/D			4,5	7,1	7,1	11,0	A2
	D	Severo suficiente					

Classificação das zonas de severidade de vibração para máquinas dos Grupos 1, 2, 3 e 4.
Zona A: Vibração de máquinas em Stat-up devem cair geralmente dentro desta zona; **Zona B:** Máquinas com vibração dentro desta zona são consideradas ACEITÁVEIS para operação irrestrita por longos períodos;
Zona C: Máquinas com vibração dentro desta zona são geralmente consideradas INSATISFATÓRIAS para operações contínuas por longos períodos;
Zona D: Valores de vibração dentro desta zona são geralmente considerados SEVEROS SUFICIENTES para causar danos à máquina.

2.7. CONFIABILIDADE EM SISTEMAS REPARÁVEIS

A confiabilidade em sistemas reparáveis é um aspecto fundamental na análise e no planejamento de manutenção de sistemas que podem ser restaurados após falhas. A aplicação de metodologias de engenharia da confiabilidade em sistemas reparáveis é essencial para garantir a disponibilidade e o desempenho desses sistemas ao longo do tempo.

A literatura destaca a importância de adotar metodologias livres de distorções na análise da confiabilidade de sistemas reparáveis, visando uma compreensão precisa da realidade e incentivando uma abordagem verossímil. A análise de confiabilidade em sistemas reparáveis envolve a modelagem de falhas e manutenções, considerando a capacidade de recuperação dos sistemas após ocorrência de falhas (Santos et al., 2022).

Modelos estatísticos e análises de dados são frequentemente empregados na modelagem de sistemas reparáveis, permitindo a compreensão dos padrões de falhas e manutenções ao longo do tempo. A revisão de abordagens básicas de modelagem para dados de falhas e manutenção em sistemas reparáveis é essencial para uma análise confiável e eficaz (Lindqvist, 2006).

A aplicação de funções de taxa de falha em sistemas reparáveis, fundamentadas em teorias específicas, é uma prática comum para avaliar a confiabilidade desses sistemas. A utilização de modelos teóricos sólidos, como a função de taxa de falha, contribui para uma análise mais precisa e abrangente da confiabilidade em sistemas reparáveis (Sellitto, 2005).

Análises quantitativas da confiabilidade em sistemas com reparo são essenciais para identificar oportunidades de melhoria e aumentar a confiabilidade desses sistemas. A proposição de alterações e ajustes com base em análises confiáveis pode contribuir significativamente para aprimorar a confiabilidade e a disponibilidade de sistemas reparáveis (Santos et al., 2015).

Em resumo, a aplicação de modelos e análises de confiabilidade em sistemas reparáveis é fundamental para garantir a operação eficiente e confiável desses sistemas ao longo do tempo, contribuindo para a redução de falhas, a otimização da manutenção e a melhoria da disponibilidade operacional.

2.7.1. Confiabilidade em ventiladores industriais

O ventilador centrífugo tem como função o transporte do fluxo de ar, em que converte a energia mecânica proveniente da rotação do rotor, em energia potencial e cinética. Graças a essa energia adquirida, o ar torna-se capaz de vencer as resistências oferecidas pelo sistema, podendo assim realizar a secagem. Secagem no qual, pode obter uma redução do tempo de processamento, devido às altas temperaturas, que elevam a capacidade do ar em absorver a água, ao grande fluxo de vazão de ar que passa através do produto e a pressão, que faz o produto escoar ao longo de tubulações ou dutos e vencer as resistências oferecidas (Spolaor et al., 2019).

Segundo o mesmo autor, seu funcionamento consiste na alta rotação do rotor, que contém em seu interior uma carcaça em formato de uma espiral, providos de pás (que ajudam a carregar o produto). Seu princípio de trabalho é semelhante aos das bombas centrífugas, onde fluido, no caso ar, entra na direção axial ao eixo de rotação e, então é movido do centro para a periferia do rotor por ação da força centrífuga, saindo perpendicular ao mesmo eixo. Dentro do caracol rotativo é gerada uma alta força centrífuga. Justamente pelo equipamento trabalhar em altas rotações, os desgastes de seus componentes são maiores.

A análise da confiabilidade em sistemas reparáveis de ventiladores industriais envolve a modelagem de falhas e reparos, levando em consideração a capacidade de recuperação dos equipamentos após falhas. A utilização de modelos estatísticos e análises de dados é comum nesse contexto, permitindo compreender os padrões de falhas e manutenções ao longo do tempo e identificar oportunidades de melhoria na confiabilidade dos ventiladores (Mendes e Souza, 2020; Lindqvist, 2006).

Neste contexto, A substituição de um ventilador industrial é crucial em várias circunstâncias para assegurar a eficácia e segurança do sistema de ventilação. Alguns motivos que podem requerer a troca de um ventilador industrial incluem falhas mecânicas, desgaste excessivo de componentes, redução na eficiência de ventilação, aumento do ruído gerado e a necessidade de atualização tecnológica para melhorar o desempenho (Bianchi et al., 2013; Gawali et al., 2020).

Falhas mecânicas, como vibrações anormais ou desequilíbrio nas pás do ventilador, podem indicar a necessidade imediata de substituição para evitar danos mais graves ao equipamento (Gawali et al., 2020; Panova e Spiridonov, 2013). Além disso, o desgaste ao longo do tempo, especialmente em componentes críticos como as pás do ventilador, pode levar a uma redução na eficiência do sistema de ventilação, tornando a troca do ventilador uma opção viável para manter o desempenho adequado (Bianchi et al., 2013;

Gawali et al., 2020).

No caso das vibrações, essas podem impactar significativamente o desempenho dos ventiladores industriais, levando a diversas consequências que afetam sua eficiência e confiabilidade. Os efeitos das vibrações no desempenho dos ventiladores industriais são multifacetados e podem ser observados em diferentes aspectos da operação dos ventiladores. Vibrações em ventiladores industriais podem resultar em aumento dos níveis de ruído, o que não só afeta o conforto do ambiente de trabalho, mas também pode indicar possíveis problemas mecânicos no sistema de ventiladores (Zhang et al., 2019).

Vibrações excessivas podem levar à fadiga e desgaste estrutural, reduzindo a vida útil operacional do ventilador e potencialmente causando falhas inesperadas (Zhu et al., 2021). Além disso, as vibrações podem impactar o desempenho aerodinâmico das pás do ventilador, afetando os padrões de fluxo de ar e a eficiência geral (Ebrahimi et al., 2018).

Além disso, as vibrações nos ventiladores industriais podem complicar os processos de detecção e diagnóstico de falhas. O monitoramento das vibrações é crucial para detectar sinais precoces de falhas mecânicas, como rachaduras ou desalinhamentos das pás, que podem impactar o desempenho e a segurança do ventilador (Hu e Li, 2015). Técnicas avançadas, como modelos de aprendizado de máquina, podem ser empregues para analisar dados de vibração e prever possíveis falhas de ventiladores (Zaki, 2023).

Já no caso do aumento do ruído emitido pelo ventilador também pode ser um sinal de que a substituição é necessária, pois isso pode indicar problemas nas pás, no motor ou em outros componentes que afetam o funcionamento adequado do equipamento. Além disso, a necessidade de atualização tecnológica para incorporar novas técnicas de controle de estol e detecção de falhas pode ser um motivo válido para a troca do ventilador, visando melhorias no desempenho e na eficiência energética (Bianchi et al., 2013).

Em resumo, a substituição de um ventilador industrial pode ser necessária devido a falhas mecânicas, desgaste excessivo, redução na eficiência, aumento do ruído ou para incorporar tecnologias mais avançadas que melhorem o desempenho do sistema de ventilação.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo será exposta a metodologia utilizada, uma breve apresentação da empresa, e como será conduzido o estudo de caso deste estudo.

3.1. TIPOLOGIA DA PESQUISA

O estudo da tipologia de casos envolve a classificação e categorização de casos com base em características, atributos ou padrões específicos para facilitar a análise, comparação e compreensão dentro de um determinado contexto de pesquisa. Os investigadores utilizam tipologias de casos para organizar e estruturar casos, permitindo-lhes obter insights significativos, identificar pontos em comum ou diferenças e desenvolver quadros teóricos ou modelos baseados nos padrões identificados (Blok et al., 2014; Stapley et al., 2022).

As tipologias de casos são desenvolvidas através de diversas abordagens metodológicas, como pesquisa exploratória de casos, análise aninhada ou análise de tipo ideal, dependendo dos objetivos da pesquisa e da natureza dos casos sob investigação. Estas tipologias ajudam os investigadores a selecionar casos para análise intensiva, melhorando a compreensão conceptual dos tipos de casos e identificando estratégias de intervenção ou resultados associados (Gerring e Cojocar, 2016; Skrypek et al., 2008).

O desenvolvimento de tipologias de casos muitas vezes envolve um processo sistemático de coleta, análise e classificação de dados para criar categorias ou classificações significativas de casos (Ginigaddara et al., 2021; Witmeur & Fayolle, 2011). Os pesquisadores podem utilizar estudos de caso qualitativos, abordagens de métodos mistos ou teoria fundamentada nos dados para refinar e validar as tipologias, garantindo sua relevância e aplicabilidade ao contexto de pesquisa.

Para a realização do estudo de caso foi selecionado um equipamento como referência da melhoria de confiabilidade, o critério de seleção se pautou na quantidade de falhas apresentada pelo equipamento no período de outubro de 2023 até maio 2024, sendo ele a Tecnologia Max.

3.2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A Empresa X é uma empresa multinacional com significativa importância econômica na exportação de produtos de tabaco do Brasil. A empresa contribui anualmente com mais de R\$ 10 bilhões em receitas tributárias e contribui com aproximadamente 80 % do desenvolvimento econômico das cidades onde atua. Esta extensa presença territorial também se reflete na sua complexa rede de distribuição. A empresa fornece diretamente para mais de 300 mil pontos de venda em 5,5 mil cidades brasileiras, sendo uma das operações de distribuição mais complexas do seu segmento e uma das mais amplas do país.

Atualmente, a empresa está sediada no Rio de Janeiro (RJ), com centro administrativo e centro de distribuição integrado em São Paulo (SP). Além disso, possui fábricas de processamento de tabaco em Santa Cruz do Sul (RS), Blumenau (SC) e Rio Negro (PR). Destaca-se também sua fábrica em Uberlândia (MG), considerada uma das maiores e mais modernas da América Latina e foco deste estudo. Para complementar sua estrutura, a empresa conta com um centro de pesquisa e desenvolvimento em Cachoeirinha (RS) e um centro de beneficiamento de fumo em Rio Negro (PR). Além disso, possui trinta e seis centros de distribuição espalhados por todo o país.

3.3. ESTUDO DE CASO

A empresa passou por diversas falhas de ventiladores de sucção, gerando grandes prejuízos. A interrupção de um sistema de produção acarreta consequências financeiras significativas para as empresas industriais. Quando uma linha de produção é paralisada, seja devido a falhas mecânicas, a perda financeira é iminente.

A ocorrência repetida de quebras nos ventiladores é um evento preocupante, pois demonstra uma falha sistêmica que afeta várias máquinas dentro do mesmo módulo. Essa recorrência não apenas compromete a operacionalidade das máquinas afetadas, mas também mina a confiabilidade geral do equipamento. Diante disso, foi necessário conduzir uma análise aprofundada das causas raízes por trás dessas falhas recorrentes. Identificar os fatores subjacentes que contribuem para as quebras dos ventiladores é fundamental para implementar medidas corretivas eficazes e restaurar a confiabilidade do equipamento. Essa avaliação não apenas abordará os sintomas imediatos das falhas, mas

Conforme as diretrizes do relatório de manutenção preditiva que segue a ISO 10816, explicada na seção 2.5, o equipamento em análise exibiu vibrações em níveis considerados alarmantes.

De acordo com os dados dos níveis de vibração, o tempo necessário para realizar a troca de equipamentos em estado de alarme varia de três a cinco dias de acordo com orientações da empresa terceira de coleta preditiva. Considerando que a empresa enfrenta uma pressão significativa para cumprir os volumes de produção estabelecidos, a execução das atividades de manutenção é programada para ocorrer após a conclusão do volume semanal. Consequentemente, as intervenções ocorrem no sétimo dia. Como resultado, muitos dos equipamentos apresentavam falhas antes da realização da substituição preventiva.

Para o equipamento apresentando nesse trabalho, os estados de vibração do ventilador são separados em estado satisfatório, alerta, alarmante. Na Figura 4 é possível visualizar um exemplo de modelo de coleta preditiva. Dados com vibração abaixo de 2,8 mm são considerados satisfatórios, entre 2,8 mm e 7,1 mm são considerados em estado alerta e acima de 7,1 mm em estado de alarmante. É possível observar que entre os meses de setembro e outubro houve uma substituição do ventilador, dessa forma, os dados de coletada saíram de alarmante para satisfatório. Pelas orientações internas da empresa é programado a substituição do equipamento logo após coleta em estado de alarmante.

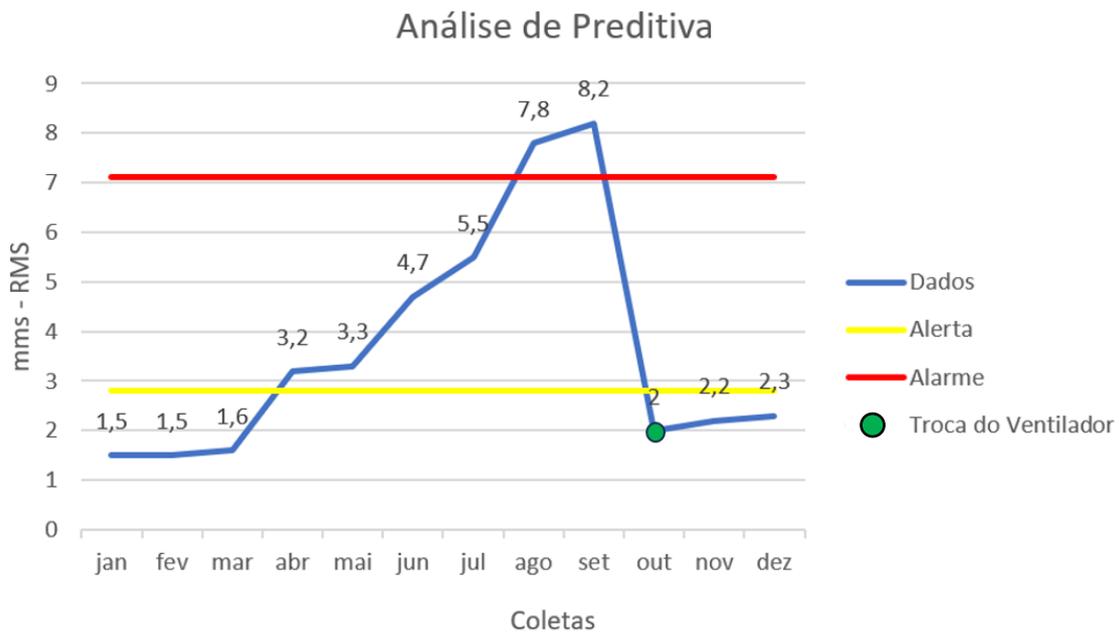


Figura 4. Exemplo de uma análise preditiva do equipamento ventilador do Max.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir desta seção inicia-se o processo prático para alcance das propostas deste estudo de caso. A base inicial de informações acerca das condições atuais do equipamento é formada de indicadores obtidos a partir das anotações dos operários e planilhas elucidadas na seção 3.4. Como dito anteriormente, o ponto de partida dos indicadores analisados neste estudo de caso é o histórico do período de outubro de 2023 a maio de 2024.

4.1. INFORMAÇÕES PREDITIVAS

Em busca da causa do aumento de vibrações na tecnologia, a análise inicial da máquina visou identificar as principais causas de falhas e determinar se existia alguma semelhança entre elas, nos componentes críticos elucidados pela Fig. 3. Entre as onze ocorrências de falha registradas nos meses de dezembro de 2023 e janeiro de 2024 um equipamento se destacou pela necessidade recorrente de troca.

Nesse contexto, uma investigação mais aprofundada revelou disparidades entre esse equipamento e os demais, especialmente no que se refere ao sistema de polias. Enquanto o equipamento em questão utilizava uma polia de correia de três canais com uma tensão de 60 Hz (Fig. 5), os demais equipamentos da empresa haviam sido atualizados para polias de 12 canais, permitindo o uso de apenas uma correia com uma tensão aplicada entre 35 e 40 Hz (Fig. 6). Isso sugere uma possível relação entre o tipo de polia utilizado e a frequência de falhas observada, indicando a necessidade de padronização e, potencialmente, uma revisão do sistema de polias para melhorar a confiabilidade dos equipamentos.

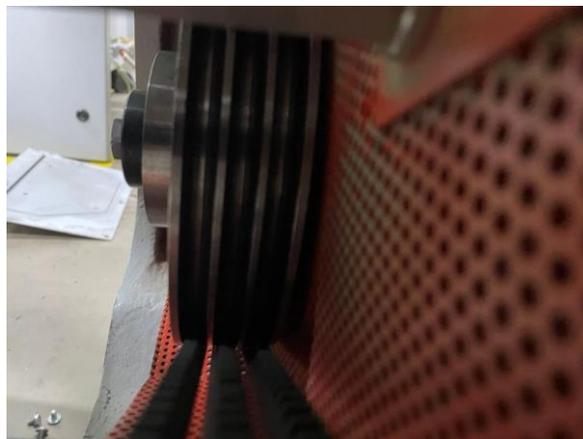


Figura 5. Correia de três canais com uma tensão de 60 Hz.



Figura 6. Polias de 12 canais que permitem o uso de apenas uma correia com uma tensão aplicada entre 35 e 40 Hz.

A principal causa das falhas nos ventiladores, indicado pela coleta de dados e análise realizada pela equipe técnica, foi o desbalanceamento do rotor. Este desbalanceamento resultou no travamento do rolamento interno do rotor, ocasionando o bloqueio do ventilador e, conseqüentemente, a interrupção da produção.

Neste contexto, o corpo técnico determinou a padronização das polias para o sistema Poly V de 12 canais para a Tecnologia Max. Essa decisão foi tomada visando resolver o problema de tensionamento uniforme que estava presente no sistema anterior, contribuindo assim para a mitigação de falhas.

Com isso, foi desenvolvido, em colaboração com técnicos, analistas e fornecedores, um projeto destinado a assegurar o balanceamento adequado desse equipamento. É importante salientar que a identificação precisa dessa causa é fundamental para implementar medidas corretivas e preventivas eficazes, a fim de minimizar as paradas não planejadas e otimizar a continuidade operacional.

4.2. PROCESSO DE RECUPERAÇÃO

Nos relatórios de preditivos da Tecnologia Max da empresa X, sugere-se inspecionar os seguintes pontos, seguindo a norma NBR 10082, explicitada na seção 2.6:

- Inspecionar rotor (limpeza/desgaste/deformações);
- Balancear rotor 7.500 RPM;
- Inspecionar base (parafuso/amortecedores);
- Trocar rolamentos do ventilador;
- Avaliar eixo (base de rolamentos e polia);
- Avaliar folga de mancais (alojamento de rolamentos);

- Avaliar estado de polias e correias;
- Realizar alinhamento de polias a laser;
- Realizar tensionamento de correias conforme recomendações do fabricante.

Caso a vibração esteja fora do estipulado pela norma ISO 10816 (seção 2.5), solicita-se uma nova coleta. Caso a vibração permaneça a mesma, as outras alternativas são os rolamentos e/ou desbalanceamento do ventilador.

No caso do ventilador estudado, a questão do desbalanceamento dos ventiladores foi abordada diretamente com o fornecedor responsável pela manutenção do equipamento. Outra questão observada foi que nos últimos quatro meses, cerca de 90 % dos ventiladores foram encaminhados para um fornecedor específico. Diante disso, foi realizada uma análise detalhada do processo de recuperação do equipamento junto a este fornecedor.

Após a análise do processo de recuperação, identificou-se a necessidade de assegurar que o balanceamento dos ventiladores estivesse em conformidade com as especificações do fabricante. Nesse sentido, propôs-se o desenvolvimento de uma bancada de balanceamento, conforme ilustrado nas Fig. 7 e 8, para garantir a precisão e eficácia desse procedimento.



Figura 7. Gaiola da bancada de balanceamento.

O local onde a bancada foi instalada é cercado por proteções, com o objetivo de garantir a segurança dos técnicos que realizam o balanceamento. A bancada é fixada no

chão e possui um espaço designado para o motor de 30 CV com rotação de 3500 RPM, o mesmo utilizado na empresa, e o ventilador que será balanceado, ambos conectados por uma correia. Para alcançar a velocidade de rotação estabelecida pela norma, foi realizada uma adaptação com um conversor, permitindo que a rotação atinja 8000 RPM, visto que é necessário de 7500 RPM para executar o balanceamento.



Figura 8. Bancada de balanceamento.

Para executar a atividade é utilizado um medidor de balanceamento que coleta as leituras de fases e amplitude (Fig. 9).

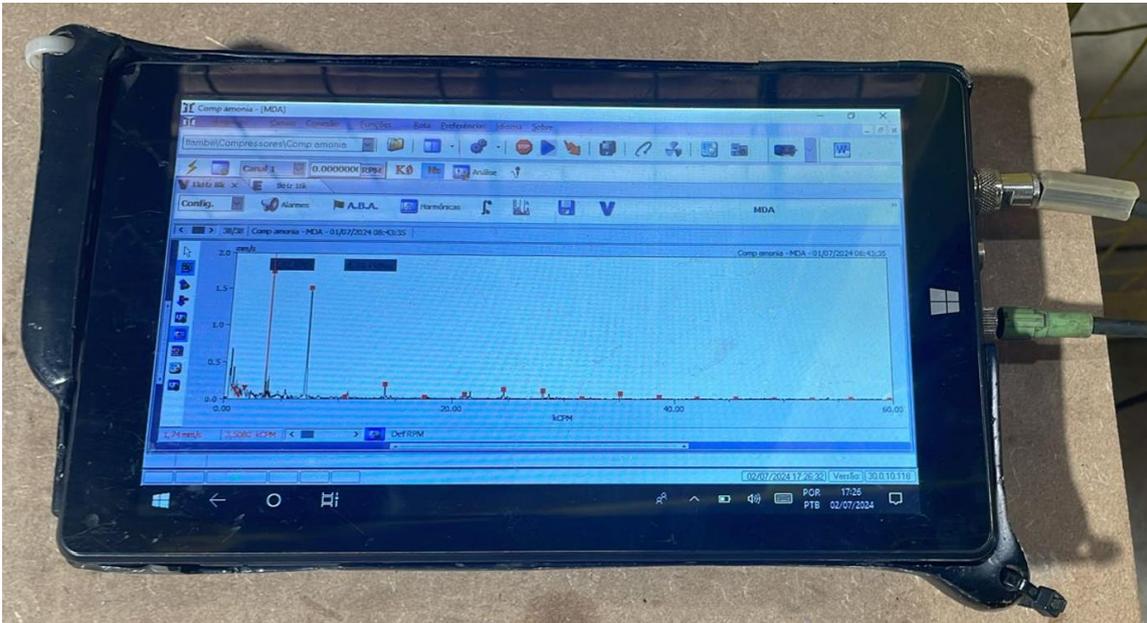


Figura 9. Equipamento para coleta dos dados.

Com a coleta dos dados é executado o seguinte passo a passo para o

balanceamento dos ventiladores.

1. Introduzir os parâmetros da máquina e grau de parâmetros desejados no equipamento.
2. Posicionar o acelerômetro no mancal do ventilador
3. Coletar as leituras de fase e amplitude
4. Colocar a massa de teste de acordo com a recomendação
5. Coletar a amplitude e fase da vibração
6. Verifique se houve redução na vibração
7. Remover ou manter a massa de teste
8. Retirar massa para correção de acordo com instrução do equipamento
9. Fazer nova coleta e verificar se os resultados estão especificados de acordo com norma da ISO.
10. Caso os resultados não estejam de acordo coloque a nova massa e repetir os passos 8° e 9°.

Após a implementação da bancada de teste, foi elaborado um modelo de relatório para acompanhar a recuperação do ventilador (Fig. 10). Esse relatório visa garantir a conformidade do equipamento, verificar os reparos realizados e fornecer dados para análise em caso de eventuais falhas, dentro das tolerâncias estabelecidas (Fig. 11).

Equipamento: TAG: M1 VT 22 SSE: 6455

CheckList manutenção ventiladores:

Descrição	Reparo	Balanceamento /Manutenção
ROTOR	BALANCEAMENTO	Ok
CUBO	RECUPERAÇÃO CUBO	Ok
TAMPA TRASEIRA	NADA OBSERVADO	Ok
TAMPA FRONTAL	NADA OBSERVADO	Ok
EIXO	RECUPERAÇÃO EIXO	Ok
BASE /CARÇAÇA	NADA OBSERVADO	Ok
ROLAMENTO	TROCADO AMBOS OS LADOS – 6208 C3 SKF 2Z	Ok
LIMPEZA	LIMPEZA CARÇAÇA E ROTOR.	Ok
PINTURA	PINTURA COMPLETA EM COMPONENTES VENTILADOR COR CINZA.	Ok
Observação final:		Ok

Figura 10. Checklist de manutenção de ventiladores.

TABELA DE TOLERÂNCIAS:

EIXO: CHEGADA

LADO POLIA: LA		LADO ROTOR: LOA	
DIAM. 40MM	+0.000 / - 0.000	DIAM. 40MM	+0.000 / - 0.000

EIXO: SAIDA - interferencia de montagem:

LADO POLIA: LA		LADO ROTOR: LOA	
DIAM. 40MM	+0.004 / - 0.000	DIAM. 40MM	+0.003 / - 0.000

CUBO: CHEGADA

LADO POLIA: LA		LADO ROTOR: LOA	
DIAM. 80MM	+0,000 / -0,002	DIAM. 80MM	+0,001 / -0,000

CUBO: SAIDA - interferencia de montagem:

LADO POLIA: LA		LADO ROTOR: LOA	
DIAM. 80MM	+0,005 / -0,000	DIAM. 80MM	+0,005 / -0,000

Figura 11. Tabela de tolerâncias.

Após o balanceamento o técnico responsável é capaz de emitir um certificado de balanceamento, garantindo se as vibrações estão respeitando o explicitado pela norma NBR 10082, mostrada na Tab. 1. Tal norma estabelece os requisitos a serem utilizados na avaliação do estado de funcionamento de máquinas rotativas, que operam entre 600 RPM e 5000 RPM, com potência acima de 15 kW e frequência de vibração entre 10 Hz e 1 000 Hz, pela medição de vibrações mecânicas nas partes não rotativas.

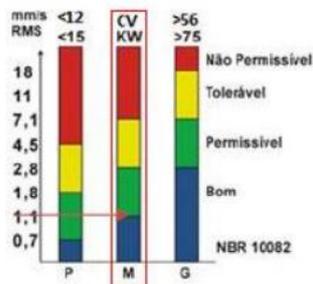
Com todo o procedimento realizado o relatório consta com o certificado de balanceamento, no relatório pode-se verificar:

- Rotação de trabalho do ventilador.
- Rotação de balanceamento .
- Peso do Corpo: peso do equipamento.
- Compensação: indicação do acréscimo ou retirada de material.
- Desbalanceamento primitivo: carga acrescentada para localizar o ponto de desbalanceamento.
- Diâmetro de compensação: local onde a massa é retirada com ponto de referência no centro.
- Desequilíbrio Residual: quantidade de material retirada para balanceamento.
- Amplitude: indicação do desbalanceamento primitivo e balanceamento com retirada residual.

Certificado de Balanceamento

CLIENTE: ██████████ PEÇA: M1VT22 ROTAÇÃO DE TRABALHO (RPM):6500 ROTAÇÃO DE BALANCEAMENTO (RPM):6774 PESO DO CORPO (Kg): aprox. 5 GRAU DE QUALIDADE (G): 2,5			
PLANOS DE CORREÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> PLANO ÚNICO <input type="checkbox"/> DOIS PLANOS			
COMPENSAÇÃO: <input type="checkbox"/> ADIÇÃO DE MATERIAL <input checked="" type="checkbox"/> RETIRADA DE MATERIAL <input type="checkbox"/> MOVIMENTAÇÃO DE MATERIAL			
	PLANO 1	PLANO 2	Amplitude mm/s
DESBALANCEAMENTO PRIMITIVO (g):	2,8	NA	13,2
DIAMENTO DE COMPENSAÇÃO(mm):	180	NA	
DESEQUILIBRIO RESIDUAL (g):	0,17	NA	1,27

Gráfico para referência:



Conclusões:

Equipamento encontra-se **balanceado** e com níveis de vibrações na ordem de **1,27mm/s**, estando dentro das tolerâncias estabelecidas pela norma NBR 10082

Figura 12. Certificado de balanceamento.

Assim, com a análise de num período de 12 meses utilizado o método de possoin, foi calculado a confiabilidade e taxa de falhas relacionadas aos ventiladores. Foi observado que confiabiliade do equipamento reduziu de 85 % para 39 % ao longo de um período de quatro meses (novembro 2023 a fevereiro 2024). Ademais, a taxa de previsão de falhas aumentou de 0,5 para 1,6, como apresentado nas Fig. 13 e 14.



Figura 13. Confiabilidade Novembro 2023.

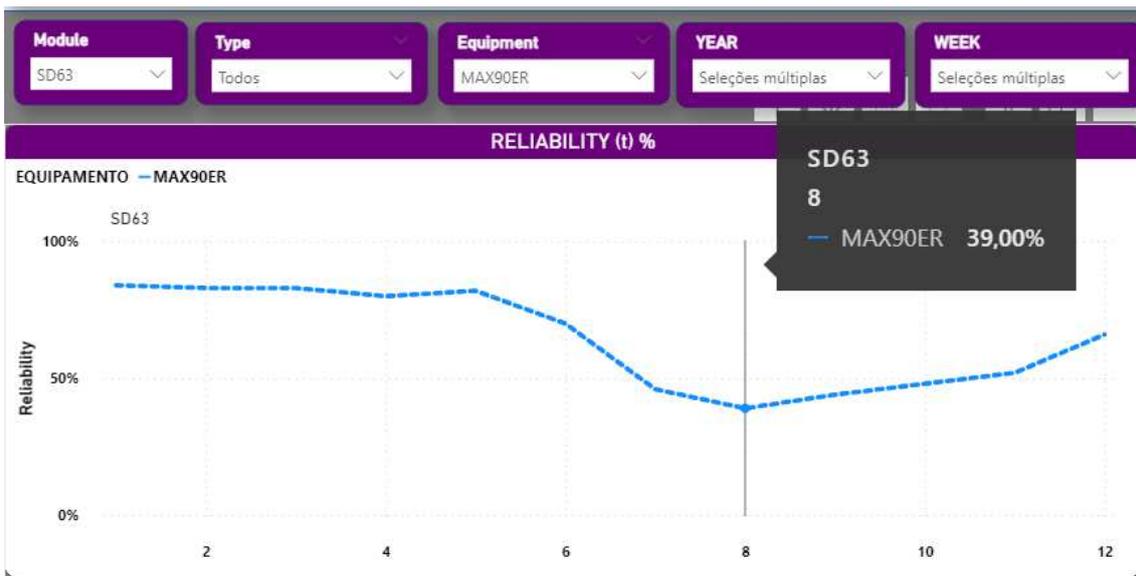


Figura 14. Confiabilidade Fevereiro 2024.

Com a implementação da bancada de teste as falhas dos ventiladores reduziram, assim a confiabilidade aumentou de 39 % para 66 % ao longo de um período de quatro meses (março 2024 a junho de 2024). Ademais, as taxas de previsão de falhas reduziram de 1,6 para 0,9, como apresentado na Fig. 15.

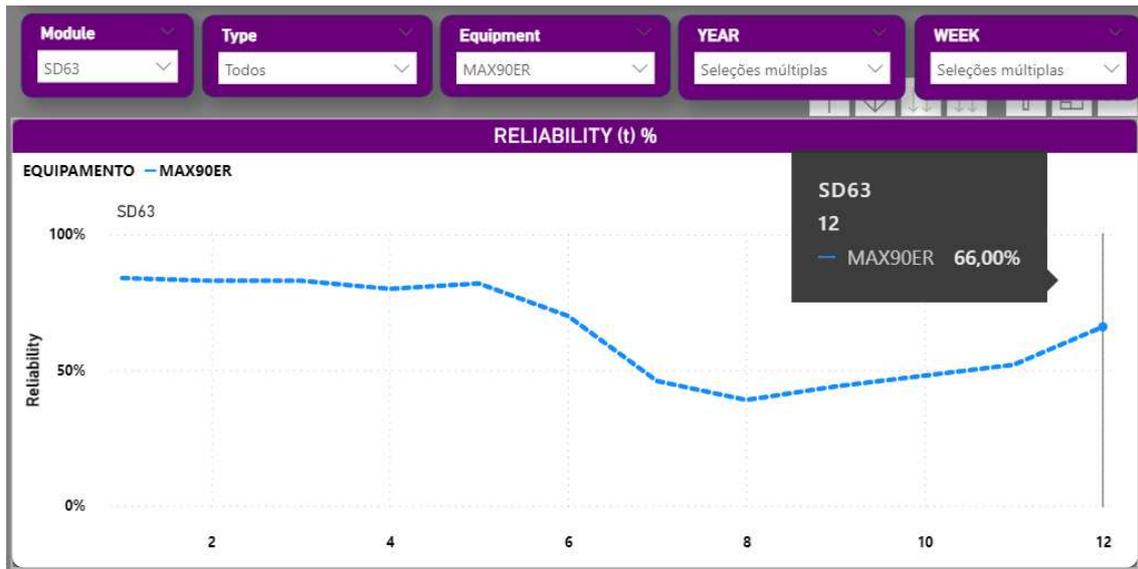


Figura 15. Confiabilidade Junho 2024.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo de caso destacou a importância da análise preditiva de vibração na manutenção e confiabilidade de equipamentos de sucção em uma indústria de grande porte. Através da implementação de técnicas de monitoramento de vibração e seguindo as normas ISO 10816 e NBR 10082, foi possível identificar e mitigar falhas recorrentes em ventiladores industriais, um componente crítico na linha de produção.

Os resultados obtidos demonstraram uma redução significativa na confiabilidade dos ventiladores após a troca inicial, caindo de 82 % para 39 % ao longo de três meses. Este declínio evidenciou a necessidade de intervenções mais eficazes e fundamentadas em dados preditivos precisos. A partir da implementação de contramedidas específicas, como a padronização do sistema de polias para o sistema Poly V de 12 canais e o desenvolvimento de um projeto de bancada para balanceamento adequado dos rotores, observou-se um aumento na confiabilidade e uma redução na taxa de falhas, destacando a importância da manutenção preditiva, possibilitando a melhoria da continuidade operacional.

Com essa melhoria e a redução das quebras, a empresa eliminou tempos de máquina parada, resultando em um aumento significativo na produção. Comparando os meses com alto índice de quebras antes da implementação do projeto, a empresa obteve um lucro aproximado de R\$ 1.650.000,00. Isso demonstra claramente como investir na confiabilidade dos equipamentos pode gerar evitar gastos substanciais que podem ser realocados em outras áreas de interesse ou demanda na empresa X.

Este trabalho reafirma a importância de uma abordagem proativa na manutenção de equipamentos industriais, utilizando técnicas preditivas para garantir a confiabilidade e eficiência operacional. A implementação de tais práticas não só melhora a produtividade, mas também contribui para a sustentabilidade e competitividade da indústria.

Para trabalhos futuros sugere-se ampliar o uso de sensores de vibração e outras tecnologias preditivas para outros componentes críticos da linha de produção, além dos ventiladores. Isso permitirá uma visão mais abrangente da saúde dos equipamentos e potencializará a manutenção preditiva em toda a planta industrial.

REFERÊNCIAS

- Andreica, M. and Offenber, A. (2023). Hybrid optimal deep learning with iot based smart based monitoring and maintenance system for axial flow fan using feature optimization. *Journal of Advanced Zoology*, 44(3), 291-308. <https://doi.org/10.17762/jaz.v44i3.401>
- ABNT. NBR 10082. Ensaio não destrutivo – Análise de vibrações – Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 rpm a 15 000 rpm. 2011. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=088639>>. Acesso em: 14 maio 2024.
- Ballani, F., Stoyan, D., & Wolf, S. (2007). On two damage accumulation models and their size effects. *Journal of Applied Probability*, 44(01), 99-114. <https://doi.org/10.1017/s0021900200002746>
- Bianchi, S., Corsini, A., Sheard, A., & Tortora, C. (2013). A critical review of stall control techniques in industrial fans. *Isrn Mechanical Engineering*, 2013, 1-18. <https://doi.org/10.1155/2013/526192>
- Blok, C., Meijboom, B., Luijkx, K., Schols, J., & Schroeder, R. (2014). Interfaces in service modularity: a typology developed in modular health care provision. *Journal of Operations Management*, 32(4), 175-189. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2014.03.001>
- Braglia, M., Castellano, D., & Gallo, M. (2019). A novel operational approach to equipment maintenance: tpm and rcm jointly at work. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(4), 612-634. <https://doi.org/10.1108/jqme-05-2016-0018>
- Carolan, C., Forbat, L., & Smith, A. (2015). Developing the descarte model. *Qualitative Health Research*, 26(5), 626-639. <https://doi.org/10.1177/1049732315602488>
- Ciani, L., Guidi, G., Patrizi, G., & Galar, D. (2021). Condition-based maintenance of hvac on a high-speed train for fault detection. *Electronics*, 10(12), 1418. <https://doi.org/10.3390/electronics10121418>
- CROW, L. H. Confidence intervals on the reliability of repairable systems, *Reliability and Maintainability Symposium – RAMS*, 1993.
- CROW, L.H. Reliability analysis for complex, repairable systems, technical report, AMSAA – Army Materiel Systems Analysis Activity, 1975.
- Dash, S. K., Raj, S., Agarwal, R., & Mishra, J. (2021). Automobile predictive

- maintenance using deep learning. *International Journal of Artificial Intelligence and Machine Learning*, 11(2), 1-12. <https://doi.org/10.4018/ijaiml.20210701.0a7>
- Fang, F., Zhao, Z., Huang, C., Zhang, X., Wang, H., & Yang, Y. (2019). Application of reliability-centered maintenance in metro door system. *Ieee Access*, 7, 186167-186174. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2960521>
- Faÿ, G., González-Arévalo, B., Mikosch, T., & Samorodnitsky, G. (2006). Modeling teletraffic arrivals by a poisson cluster process. *Queueing Systems*, 54(2), 121-140. <https://doi.org/10.1007/s11134-006-9348-z>
- Febriyanti, E., Suhadi, A., & Sari, L. (2023). Implementation of root cause analysis method to investigate failure of front wall tube boiler. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, 14(3), 243-250. <https://doi.org/10.29122/mipi.v14i3.4104>
- Firdaus, N., Ab-Samat, H., & Prasetyo, B. (2023). Maintenance strategies and energy efficiency: a review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 29(3), 640-665. <https://doi.org/10.1108/jqme-06-2021-0046>
- Fogliatto, F.; Ribeiro, J. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009, 265p.
- Fraga, L. G.; Pinto, E. R. O Processo de Weibull Poisson para Modelagem da Confiabilidade em Sistemas Reparáveis. *ais do XII Encontro Mineiro de Estatística – MGEST 2013*. Uberlândia – 05 e 06 de setembro de 2013. *Revista Matemática e Estatística em Foco – ISSN: 2318-0552*
- Gawali, R., Awatade, S., & Nilewar, A. (2020). Vibration analysis of industrial air blower using finite element analysis. *International Journal of Innovations in Engineering and Science*, 5(10), 31. <https://doi.org/10.46335/ijies.2020.5.10.7>
- Gerring, J. and Cojocaru, L. (2016). Selecting cases for intensive analysis. *Sociological Methods & Research*, 45(3), 392-423. <https://doi.org/10.1177/0049124116631692>
- Ginigaddara, B., Perera, S., Feng, Y., & Rahnamayiezekavat, P. (2021). Development of an offsite construction typology: a delphi study. *Buildings*, 12(1), 20. <https://doi.org/10.3390/buildings12010020>
- Gyamfi, B. O. and Zigah, G. (2023). Machine maintenance type and quality of output: evidence from ghanaiian manufacturing firms. *International Journal of Business and Management Research*, 11(1), 1-13. <https://doi.org/10.37391/ijbmr.110101>
- He, Y., Han, X., Gu, C., & Chen, Z. (2018). Cost-oriented predictive maintenance based on mission reliability state for cyber manufacturing systems. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(1), 168781401775146.

<https://doi.org/10.1177/1687814017751467>

- Huddleston, R. (2004). Two-parameter failure model improves time-independent and time-dependent failure predictions. <https://doi.org/10.2172/15009772>
- International Organization for Standardization. ISO 10816-3: Mechanical vibration: evaluation of machine vibration by measurements on nonrotating parts. Local: ISO, 2009.
- Jain, A., Bhatti, R., & Singh, H. (2015). Oee enhancement in smes through mobile maintenance: a tpm concept. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 32(5), 503-516. <https://doi.org/10.1108/ijqrm-05-2013-0088>
- Jardine, A.K.S.; Tsang, A.H.C. (2013) *Maintenance, Replacement, and Reliability Theory and Applications*. Second Edition, Taylor & Francis Group, LLC.
- Jena, M. (2023). Integration of industry 4.0 with reliability centered maintenance to enhance sustainable manufacturing. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 43(2). <https://doi.org/10.1002/ep.14321>
- Jørgensen, H. S., Nakayama, H., Raaschou, H. O., & Olsen, T. S. (1995). *Recovery of walking function in stroke patients: The copenhagen stroke study*. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 76(1), 27–32. doi:10.1016/s0003-9993(95)80038-7
- Klutke, G.; Kiessler, P.; Wortman, M. A critical look at the bathtub curve. *IEEE Transactions on Reliability*, v.52, n.1, p.125-129, 2003.
- Li, S. and Wen, M. (2022). Types of maintenance based on uncertain data envelope analysis. *Symmetry*, 14(7), 1429. <https://doi.org/10.3390/sym14071429>
- Leavy, A., Nakas, G., & Papadopoulos, P. (2023). A method for variance-based sensitivity analysis of cascading failures. *Ieee Transactions on Power Delivery*, 38(1), 463-474. <https://doi.org/10.1109/tpwrdr.2022.3199150>
- Lee, Y., Ahuja, V., Hosangadi, A., Slipper, M., Mulvihill, L., Birkbeck, R., ... & Coleman, R. (2011). Impeller design of a centrifugal fan with blade optimization. *International Journal of Rotating Machinery*, 2011, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2011/537824>
- Lindqvist, B. (2006). On the statistical modeling and analysis of repairable systems. *Statistical Science*, 21(4). <https://doi.org/10.1214/088342306000000448>
- Mendes, T. and Souza, D. (2020). Aplicação do método de análise dos componentes principais (pca) para detecção de falhas em plantas químicas. *Research Society and Development*, 9(8), e957986335. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.6335>

- Nowotarski, J. and Weron, R. (2018). Recent advances in electricity price forecasting: a review of probabilistic forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1548-1568. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.234>
- Obradović, D., Šperac, M., & Marenjak, S. (2023). Challenges in sewer system maintenance. *Encyclopedia*, 3(1), 122-142. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010010>
- Oyekan, J., Farnsworth, M., Hutabarat, W., Miller, D. A., & Tiwari, A. (2020). Applying a 6 dof robotic arm and digital twin to automate fan-blade reconditioning for aerospace maintenance, repair, and overhaul. *Sensors*, 20(16), 4637. <https://doi.org/10.3390/s20164637>
- Patil, A., Soni, G., Prakash, A., & Karwasra, K. (2021). Maintenance strategy selection: a comprehensive review of current paradigms and solution approaches. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 39(3), 675-703. <https://doi.org/10.1108/ijqrm-04-2021-0105>
- Paxson, V. and Floyd, S. (1995). Wide area traffic: the failure of poisson modeling. *Ieee/Acm Transactions on Networking*, 3(3), 226-244. <https://doi.org/10.1109/90.392383>
- Panova, N. and Spiridonov, E. (2013). Stress-strain state and vibration frequencies of blades of the main mine fan impeller. *Open Journal of Applied Sciences*, 03(02), 56-60. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2013.32b011>
- Peeters, J., Basten, R., & Tinga, T. (2018). Improving failure analysis efficiency by combining fta and fmea in a recursive manner. *Reliability Engineering & System Safety*, 172, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.11.024>
- Petrovskiy, E., Buryukin, F. A., Bukhtiyarov, V. V., Savich, I. V., & Gagina, M. V. (2015). The fmea-risk analysis of oil and gas process facilities with hazard assessment based on fuzzy logic. *Modern Applied Science*, 9(5). <https://doi.org/10.5539/mas.v9n5p25>
- Rausand, M. and Hoyland, A. (2004) *System Reliability Theory Models, Statistical Methods, and Applications*. 2nd Ed, John Wiley & Sons, Hoboken.
- Santos, B., Campos, M., Viana, F., Freitas, D., & Silva, A. (2022). Aplicação da engenharia da confiabilidade na manutenção de sistemas reparáveis: uma revisão sistemática da literatura.. https://doi.org/10.14488/enegep2022_tn_wpg_385_1911_43495
- Santos, L. P., Pinotti, F., Ribeiro, J. L. D., & Botelho, H. C. (2015). Confiabilidade de

- sistemas redundantes com reparo em uma refinaria de petróleo. *Revista Gestão Industrial*, 11(3). <https://doi.org/10.3895/gi.v11n3.2759>
- Sarita, K., Devarapalli, R., Kumar, S., Malik, H., Márquez, F., & Rai, P. (2022). Principal component analysis technique for early fault detection. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 42(2), 861-872. <https://doi.org/10.3233/jifs-189755>
- Sellitto, M. *Formulação Estratégica da Manutenção Industrial com base na Confiabilidade dos Equipamentos*. Produção, v.15, n.1, p.44-59, 2005.
- Sharrar, L. and Danapalasingam, K. A. (2022). Intelligent vibration analysis of industrial cooling fans. *ELEKTRIKA- Journal of Electrical Engineering*, 21(2), 54-63. <https://doi.org/10.11113/elektrika.v21n2.367>
- Singhal, S. (2008). Sleeve bearing design for slow speed applications in cement plants. <https://doi.org/10.1109/citcon.2008.30>
- Singh, P. and Tan, C. M. (2021). Statistical method and non-destructive analytical tools in the failure analysis of led array. *ECS Journal of Solid-State Science and Technology*, 10(2), 025008. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/abe4a5>
- Skrypek, M., Wells, S., Bauerkemper, K., Koranda, L., & Link, A. (2008). Developing a case typology for children in out-of-home care: child welfare worker perspectives. *Families in Society the Journal of Contemporary Social Services*, 89(2), 302-311. <https://doi.org/10.1606/1044-3894.3746>
- Spolaor, B. O.; Dalto, J. L, Lopes, T., Moreira, N. A. *A manutenção preditiva em equipamento de alta criticidade: Ventiladores centrifugo radial*. IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Ponta Grossa, PR, Brasil, 04 e 06 de dezembro de 2019.
- Stapley, E., O’Keeffe, S., & Midgley, N. (2022). Developing typologies in qualitative research: the use of ideal-type analysis. *International Journal of Qualitative Methods*, 21, 160940692211006. <https://doi.org/10.1177/16094069221100633>
- Tang, C. and Dai, M. (2015). Modeling and analysis of queueing-based vary-on/vary-off schemes for server clusters. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2015/594264>
- Tarakci, H. (2015). Two types of learning effects on maintenance activities. *International Journal of Production Research*, 54(6), 1721-1734. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1055847>
- Wais, M. *ISO 10816 CONDITION MONITORING AND MACHINERY PROTECTION SYSTEMS*, 2022.

- Wang, D., Zhang, C., Chen, W., Yang, H., Zhang, M., & Lau, A. (2022). A review of machine learning-based failure management in optical networks. *Science China Information Sciences*, 65(11). <https://doi.org/10.1007/s11432-022-3557-9>
- Wang, H., Zhao, T., Ren, F., & Zhao, N. (2017). Failure propagation model based for system safety analysis. *Destech Transactions on Engineering and Technology Research*, (mimece). <https://doi.org/10.12783/dtetr/mimece2016/10006>
- Witmeur, O. and Fayolle, A. (2011). Developing and testing a typology of growth strategies of entrepreneurial it services firms. <https://doi.org/10.4337/9780857934901.00008>
- Xing, L., Wang, C., & Levitin, G. (2012). Competing failure analysis in non-repairable binary systems subject to functional dependence. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O Journal of Risk and Reliability*, 226(4), 406-416. <https://doi.org/10.1177/1748006x12441889>
- Zhu, J., Shen, B., Wang, R., & Chin, K. (2019). Risk assessment for failure mode and effects analysis using the bonferroni mean and todim method. *Mathematics*, 7(6), 536. <https://doi.org/10.3390/math7060536>