

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

VINÍCIUS AUGUSTO DA SILVA BRITO

ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE: MODELOS PROBABILÍSTICOS E
MÉTODOS DE MANUTENÇÃO

São Carlos

2024

VINÍCIUS AUGUSTO DA SILVA BRITO

*ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE: MODELOS PROBABILÍSTICOS E
MÉTODOS DE MANUTENÇÃO*

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecatrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Prof. Dr. Mário de Castro Andrade Filho

São Carlos

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B862e Brito, Vinicius Augusto da Silva
 Engenharia de Confabilidade: modelos
 probabilísticos e métodos de manutenção / Vinicius
 Augusto da Silva Brito; orientador Mário de Castro
 Andrade Filho. São Carlos, 2024.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica)
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, 2024.

1. Engenharia mecatrônica. 2. Teoria da
Confabilidade. 3. Manutenção preditiva. 4. Sistemas
mecatrônicos. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Vinicius Augusto da Silva Brito

Título: Engenharia de Confiabilidade: modelos probabilísticos e métodos de manutenção.

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecatrônica.**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mário de Castro
Andrade Filho,
SME, ICMC-USP (orientador)

Nota atribuída: 8,5 (oito e meio)

Prof. Dr. Marcelo Becker,
SEM, EESC-USP

Nota atribuída: 8,5 (oito e meio)

Prof. Dr. Daniel Varela Magalhães,
SEM, EESC-USP

Nota atribuída: 8,5 (oito e meio)

Média: 8,5 (oito e meio)

Resultado: Aprovado

Data: 28/6/2024

Assinatura do Presidente da Banca

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM X NÃO Visto do orientador: _____

RESUMO

BRITO, V. A. S. **Engenharia de Confiabilidade:** modelos probabilísticos e métodos de manutenção. 2024. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

O presente trabalho baseou-se exclusivamente em uma pesquisa bibliográfica e abordou visão descrita na literatura atual sobre a importância e a aplicação da Teoria da Confiabilidade e dos métodos avançados de manutenção em sistemas mecatrônicos. Foi explorado como a integração de componentes mecânicos, eletrônicos e de controle em sistemas mecatrônicos complexos requer uma abordagem multidisciplinar para manutenção, visando melhorar a confiabilidade e eficiência operacional. As estratégias de manutenção, incluindo a manutenção preditiva e a análise de dados em tempo real, foram destacadas como fundamentais para identificar precocemente potenciais falhas e reduzir o tempo de inatividade. A utilização de tecnologias avançadas, como a Internet das Coisas (IoT) e a Inteligência Artificial (IA), conforme descrevem os autores dos materiais pesquisados, demonstra ser crucial para a coleta e análise de dados, otimizando a manutenção preditiva. Através deste estudo também foi possível notar a ênfase dada pelos autores analisados à questão sustentabilidade e da eficiência econômica nas estratégias de manutenção. Em suma, o trabalho reforçou que a aplicação efetiva da Teoria da Confiabilidade e a adoção de estratégias de manutenção avançadas são essenciais para garantir a operação segura, confiável e eficiente de sistemas mecatrônicos em diversos setores da indústria.

Palavras-chave: Engenharia Mecatrônica. Teoria da Confiabilidade. Manutenção Preditiva. Sistemas Mecatrônicos Complexos. Tecnologias Avançadas.

ABSTRACT

BRITO, V. A. S. **ReliabilityEngineering:** Probabilistic Models andMaintenanceMethods. 2024. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

This work addressed the importance and application of reliability theory and advanced maintenance methods in mechatronic systems. It explored how the integration of mechanical, electronic, and control components in complex mechatronic systems requires a multidisciplinary approach to maintenance, aiming to improve reliability and operational efficiency. Maintenance strategies, including predictive maintenance and real-time data analysis, were highlighted as essential for early identification of potential failures and reducing downtime. The use of advanced technologies, such as the Internet of Things (IoT) and artificial intelligence (AI), proved crucial for data collection and analysis, optimizing predictive maintenance. The study also emphasized the importance of sustainability and economic efficiency in maintenance strategies. In summary, the work reinforced that effective application of reliability theory and adoption of advanced maintenance strategies are essential to ensure safe, reliable, and efficient operation of mechatronic systems across various industry sectors.

Keywords: Mechatronic Engineering. Reliability Theory. Predictive Maintenance. Complex Mechatronic Systems. Advanced Technologies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curva da Banheira (Gráfico característico da confiabilidade)	15
Figura 2 – Gráficos de (I) Probabilidade de falha e (II) Confiabilidade	17
Figura 3 – Gráfico comparativo entre custos de manutenção.....	25
Figura 4 – Método Tie-Sets	33
Figura 5 – Método Cut-Sets	34
Figura 6 – Tabela Booleana.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES	–	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
RCM	–	Reliability Centered Maintenance
FMEA	–	Failure Mode and Effect Analysis
AI	–	Artificial Intelligence
IoT	–	Internet of Things
HVAC	–	Heating, Ventilatingand Air Conditioning

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 METODOLOGIA.....	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 OS CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA TEORIA DA CONFIABILIDADE E SUA APLICABILIDADE EM COMPONENTES MECATRÔNICOS	14
3.1.1 FUNDAMENTOS DA TEORIA DA CONFIABILIDADE	14
3.1.2 APLICABILIDADE DA TEORIA DA CONFIABILIDADE EM COMPONENTES MECATRÔNICOS	27
3.2 MODELOS REALISTAS DE MANUTENÇÃO EM SISTEMAS REPARÁVEIS.....	29
3.3 ESTRATÉGIAS INTEGRADAS DE MANUTENÇÃO	37
4 CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

O campo da *Engenharia de Confiabilidade* é fundamental na Engenharia Mecatrônica, concentrando-se no estudo da probabilidade de falhas de equipamentos e na eficiência de sistemas. Esta área emergiu como uma resposta crítica à necessidade de desenvolver sistemas mais seguros e eficientes, onde a prevenção de falhas tem implicações significativas na segurança e no desempenho econômico. Modelos probabilísticos oferecem uma base sólida para analisar a confiabilidade, permitindo previsões precisas do comportamento de falhas de componentes e sistemas.

A manutenção, especialmente em contextos industriais e tecnológicos, desempenha um papel crucial na garantia da confiabilidade operacional. Métodos de manutenção, que variam de estratégias preventivas a preditivas, são essenciais para prolongar a vida útil dos equipamentos e prevenir falhas inesperadas. A integração de modelos probabilísticos nessas estratégias de manutenção tem sido uma área de intenso desenvolvimento, visando otimizar a eficiência operacional enquanto minimiza riscos.

Este estudo se caracteriza como uma revisão de literatura e se concentra, em um primeiro momento, em compreender os fundamentos da Teoria da Confiabilidade, enfocando conceitos essenciais e métodos comumente utilizados para avaliar a confiabilidade de componentes em Engenharia Mecatrônica. A confiabilidade de sistemas mecatrônicos é crucial, e a compreensão detalhada de como os componentes falham e podem ser avaliados é fundamental. O estudo visa aprofundar o conhecimento sobre as técnicas probabilísticas aplicadas à previsão e análise de falhas.

A segunda parte deste trabalho se dedica a sistemas reparáveis e modelos mais realistas de manutenção de equipamentos. Em ambientes industriais e tecnológicos, a manutenção eficaz é vital para garantir a continuidade operacional. A abordagem tradicional de manutenção é desafiada por sistemas mecatrônicos complexos, que exigem métodos mais sofisticados e realistas. Este segmento do estudo explora as estratégias de manutenção em profundidade, considerando a natureza reparável de muitos componentes mecatrônicos e a importância de um planejamento de manutenção eficiente.

Com a integração de componentes eletrônicos, mecânicos e de *software*, a confiabilidade torna-se uma questão complexa e multifacetada. Este estudo busca aprofundar o entendimento da Engenharia da Confiabilidade e dos métodos de manutenção preditiva em sistemas mecatrônicos. Busca-se preencher lacunas no conhecimento atual sobre como

integrar eficazmente dados de sensores, análises preditivas e manutenção inteligente, visando a otimização da confiabilidade e a redução de paradas não planejadas.

O objetivo geral deste trabalho é aprofundar o entendimento da Teoria da Confiabilidade e dos métodos de manutenção em sistemas mecatrônicos. Especificamente, o estudo tem como objetivos: 1) Explorar e analisar os conceitos fundamentais da Teoria da Confiabilidade e como a literatura científica descreve e analisa sua aplicabilidade em componentes mecatrônicos; 2) Investigar modelos realistas de manutenção em sistemas reparáveis, avaliando sua eficácia e aplicabilidade; 3) Apresentar estratégias integradas de manutenção que alinhem métodos avançados com as necessidades de sistemas mecatrônicos complexos, visando melhorar sua confiabilidade e eficiência operacional.

A pesquisa bibliográfica é guiada pela seguinte pergunta: Como os conceitos da Teoria da Confiabilidade e os métodos avançados de manutenção podem ser aplicados para melhorar a confiabilidade e a eficiência de sistemas mecatrônicos reparáveis? Este trabalho se justifica pela necessidade crescente de sistemas mecatrônicos mais confiáveis e métodos de manutenção avançados.

2 METODOLOGIA

De acordo com Gil et al. (2002), a pesquisa pode ser definida como o processo racional e sistemático que possui como intuito proporcionar soluções aos problemas que são propostos. Desse modo, a pesquisa é elaborada perante o concurso das compreensões disponíveis e o uso cuidadoso de métodos, estratégias e outros processos científicos. Logo, a pesquisa se desenvolve no decorrer de um procedimento que abrange diversas etapas, desde a apropriada formulação do problema até a eficiente demonstração dos resultados.

Sendo assim, segundo Marconi e Lakatos (2003), a metodologia de pesquisa é destinada a explanar sistematicamente o procedimento de pesquisa, de forma a fornecer cientificidade e a possibilitar a replicação dos experimentos por um outro pesquisador interessado em reproduzir o delineamento em sua conjuntura específica, ou trabalhar em possíveis desdobramentos.

Sendo assim, a investigação utilizou o método de uma Revisão de Literatura Narrativa, em que, para a realização do presente estudo, foi realizada a consulta a livros, dissertações, exemplos que estimulam a compreensão do tema e em artigos científicos selecionados através de busca no *Google Scholar*, *Scientific Eletrônica Library Online* (SCIELO) e Portal CAPES.

Como critérios inclusivos, foram considerados conteúdos publicados completos no que se relaciona à estrutura metodológica de desenvolvimento; publicados nos últimos cinco anos; que envolvam como estudo a Engenharia de Confiabilidade e os modelos probabilísticos e métodos de manutenção; artigos científicos originais ou de revisão.

O período cronológico (últimos cinco anos) foi estabelecido com o intuito de se pesquisar os conteúdos científicos mais recentes (com referência à data corrente do Trabalho de Conclusão de Curso), elucidando assim eficientemente o estado da arte. Como critérios de exclusão, foram estabelecidas resenhas críticas e pesquisas que não vinculem a *Engenharia de Confiabilidade* com os aspectos estudados no presente trabalho. Para tal, foram utilizadas as seguintes palavras-chave: Engenharia de Confiabilidade. Modelos Probabilísticos. Métodos de Manutenção.

Após a coleta dos conteúdos, foi necessária a realização de uma leitura analítica de resumos, de maneira a excluir estudos que não sejam compatíveis com a proposta estabelecida. Como última etapa de seleção de referências, foi desenvolvido um estudo completo dos dados metodológicos e dos resultados obtidos no intuito de selecionar apenas as publicações que contribuam diretamente para o tratamento do problema de pesquisa proposto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 OS CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA TEORIA DA CONFIABILIDADE E SUA APLICABILIDADE EM COMPONENTES MECATRÔNICOS

A Teoria da Confiabilidade se concentra na probabilidade de um sistema ou componente funcionar sem falhas durante um período especificado, sob condições operacionais definidas. Este conceito é vital para entender a durabilidade e eficiência dos sistemas mecatrônicos, em que a precisão e a confiabilidade são de suma importância (Balthazar et al., 2021).

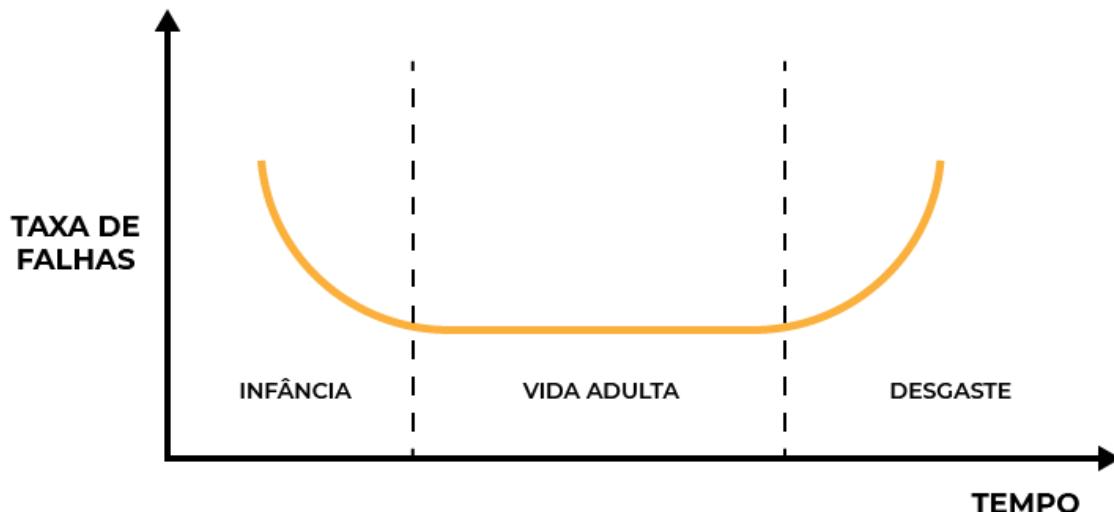
Historicamente, a Teoria da Confiabilidade surgiu como uma disciplina durante o desenvolvimento de sistemas complexos no período pós-Segunda Guerra Mundial, principalmente em contextos militares e aeroespaciais, em que a falha de sistemas poderia ter consequências catastróficas (Giacon Junior, 2018).

Tendo em vista a relevância da Engenharia da Confiabilidade no atual cenário, em especial no que se refere ao contexto industrial, parte-se para uma apresentação exploratória e não plenamente exaustiva de conceitos, ferramentas e métodos acerca da Confiabilidade de Sistemas Mecatrônicos.

3.1.1 FUNDAMENTOS DA TEORIA DA CONFIABILIDADE

Um dos conceitos fundamentais em confiabilidade é a “taxa de falhas”, que é uma medida quantitativa da frequência de falhas de um componente ou sistema. Esta medida é essencial para o planejamento e a implementação de estratégias de manutenção em sistemas mecatrônicos (Bonni, 2018). A taxa de falha ao longo do tempo é frequentemente representada pela curva da banheira, ilustrando como a taxa de falha varia em três fases distintas: mortalidade infantil, vida útil estável e desgaste ou envelhecimento.

FIGURA 1: CURVA DA BANHEIRA (GRÁFICO CARACTERÍSTICO DA CONFIABILIDADE)



Fonte: Elaboração própria, 2024

Nachlas, (2017) descreve que a curva da banheira é um conceito amplamente utilizado em mecatrônica, *Engenharia de Confiabilidade* e gestão de manutenção para representar a taxa de falhas de um sistema ou componente ao longo do tempo. Essa curva é assim chamada devido à sua forma característica, que se assemelha a uma banheira, com três distintas fases: período de mortalidade infantil, período de vida útil ou operacional e período de desgaste. Cada uma dessas fases está associada a diferentes tipos de distribuições estatísticas que descrevem a taxa de falhas em função do tempo. Vamos explorar cada fase e as distribuições associadas:

1. **Período de Mortalidade Infantil:** Esta fase ocorre no início do ciclo de vida do produto ou sistema, onde a taxa de falhas é alta, mas diminui com o tempo. As falhas são geralmente devido a defeitos de fabricação ou problemas de projeto que se tornam aparentes quando o sistema é colocado em uso. A distribuição que frequentemente modela esta fase é a **Distribuição de Weibull**, especialmente com um parâmetro de forma menor que 1 ($\beta < 1$), que apresenta uma taxa de falha decrescente.
2. **Período de Vida Útil ou Operacional:** Esta é a fase mais longa, durante a qual a taxa de falhas é aproximadamente constante, indicando que as falhas ocorrem de maneira aleatória e são menos frequentes. Este período é caracterizado por uma taxa de falha

estável e baixa. A **Distribuição Exponencial** é frequentemente usada para modelar esta fase, pois representa uma taxa de falha constante ao longo do tempo.

3. **Período de Desgaste:** Na fase final do ciclo de vida, a taxa de falhas aumenta novamente devido ao envelhecimento, desgaste e eventual falha dos componentes. A **Distribuição de Weibull** com um parâmetro de forma maior que 1 ($\beta > 1$) é adequada para modelar esta fase, pois caracteriza uma taxa de falha crescente.

É importante notar que a Curva da Banheira e as distribuições associadas são ideais para a análise de confiabilidade e ajudam os engenheiros a entender melhor como e quando os componentes ou sistemas podem falhar. Isso permite o planejamento adequado de manutenção preventiva, a substituição de peças antes do fim previsto de sua vida útil operacional e a melhoria do *design* para reduzir falhas prematuras. Em mecatrônica, essa compreensão é crucial, pois os sistemas geralmente integram elementos mecânicos e eletrônicos, cada um com seus próprios padrões de falha e desgaste (Nachlas, 2017).

Diferentes modelos probabilísticos de distribuições são usados para modelar a vida útil dos componentes, incluindo distribuições de Birnbaum-Saunders, exponencial, gama, Gompertz, lognormal e Weibull. Cada distribuição oferece *insights* sobre diferentes padrões de falha, refletindo a complexidade dos sistemas reais e a variedade de fatores que podem influenciar a confiabilidade. Estes modelos ajudam na previsão de falhas e na programação eficiente de manutenção (Nachlas, 2017).

A confiabilidade de sistemas mecatrônicos também depende fortemente de sua “manutenibilidade”, que se refere à facilidade com que um sistema pode ser reparado ou mantido. Uma manutenibilidade eficaz reduz o tempo de inatividade e aumenta a disponibilidade do sistema (Abrahão, 2020).

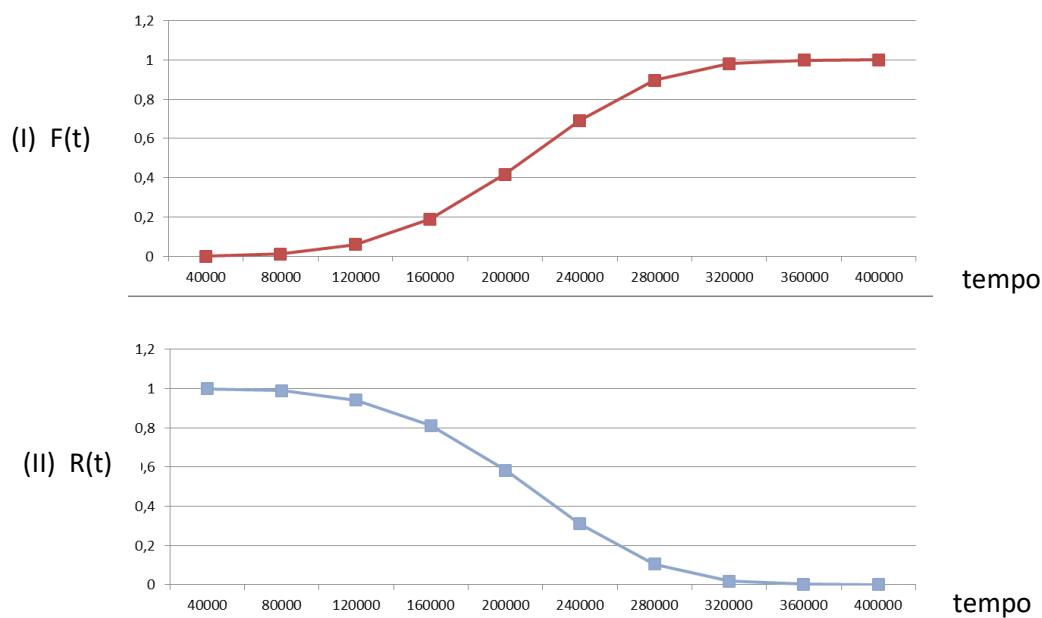
Nachlas (2017) aborda a manutenibilidade principalmente no contexto da manutenção preventiva, destacando a importância de remover dispositivos em funcionamento para reparo, substituição, ajuste, teste ou inspeção, com o objetivo de garantir uma operação mais confiável e evitar falhas. As práticas específicas de manutenção preventiva dependem do sistema em questão, mas todas são realizadas com a intenção de melhorar a confiabilidade e a segurança dos equipamentos.

Segundo o autor, duas políticas de manutenção preventiva são de absoluta relevância no cenário dos sistemas mecatrônicos, a saber: 1) política de substituição por idade, em que um dispositivo é substituído por uma nova cópia em caso de falha ou quando atinge uma idade específica definida pela política. Essa abordagem assume que o dispositivo é tão bom quanto novo após a substituição, e os modelos baseados na teoria da renovação são aplicáveis

para representar o desempenho do dispositivo; 2) política de substituição por bloco, baseada em ações programadas em vez da idade do dispositivo. O dispositivo é substituído por uma nova cópia em caso de falha ou em intervalos de tempo uniformemente espaçados. Esta política envolve a remoção de cópias relativamente novas do dispositivo, o que pode ser mais intuitivo, já que implica na substituição de dispositivos antes que falhem (Nachlas, 2017).

Ambas as políticas são analisadas em termos de custos ótimos, determinando os momentos ideais para a substituição preventiva com base em modelos de custo. Esses modelos são construídos sem considerar a duração das tarefas de manutenção, pois os custos pretendem capturar adequadamente as implicações de falhas e substituições planejadas.

FIGURA 2: GRÁFICOS DE (I) PROBABILIDADE DE FALHA E (II) CONFIABILIDADE



FONTE: Scamati, 2020

O conceito de “vida útil” dos componentes é outro aspecto importante na Teoria da Confiabilidade, pois refere-se ao período durante o qual um componente ou sistema pode funcionar de maneira eficaz. A avaliação da vida útil é essencial para o planejamento da manutenção e para a substituição oportuna de componentes (Almeida; Lima; Barbieri, 2022).

Essa avaliação, segundo Nachlas (2017), é realizada através de modelos probabilísticos e análises estatísticas. A análise de distribuições de vida, como distribuição exponencial, Weibull, lognormal e gama são algumas ferramentas utilizadas para fazer essas

análises de vida útil dos componentes e, assim, prever de forma eficaz as manutenções necessárias.

Nachlas (2017) apresenta, ainda, outros aspectos relativos ao conceito de vida útil, como os modelos de falhas, usados para entender e prever os processos de falha dos componentes, o que está intrinsecamente ligado à sua vida útil. Isso inclui modelos de dano cumulativo, *stress-strength interference*, e outros modelos baseados em física de falha. O documento de Manutenção e Reparo também se mostra uma ferramenta útil, pois explora estratégias de manutenção preventiva e preditiva, o que implica em estender a vida útil dos componentes através de intervenções programadas. Discute-se como a manutenção adequada pode prevenir falhas prematuras e maximizar a eficiência operacional dos componentes. Já a Análise de Confiabilidade considera a disponibilidade dos sistemas, a probabilidade de falhas ao longo do tempo e a aplicação de políticas de manutenção para melhorar a longevidade dos componentes.

A aplicação de análises de estresse-aceleração fornece *insights* valiosos sobre como diferentes condições operacionais podem afetar a vida útil e, por conseguinte, a confiabilidade dos componentes. Este método é especialmente útil em componentes mecatrônicos que operam em variados regimes de carga e temperatura (Sarmento, 2019).

Outro conceito relevante é a “redundância”, que desempenha um papel vital na confiabilidade de sistemas mecatrônicos. A incorporação de componentes ou subsistemas redundantes pode aumentar significativamente a confiabilidade geral, fornecendo um *backup* em caso de falha (Sarmento, 2019). O conceito de redundância é especialmente útil em sistemas mecatrônicos em que múltiplos componentes podem executar a mesma função, aumentando assim a confiabilidade do sistema (Almeida; Lima; Barbieri, 2022).

A problemática de selecionar quais componentes devem ser substituídos por versões redundantes é conhecida como problema de alocação de confiabilidade. Assume-se que cada cópia de um componente incluída no sistema possui um custo associado, que pode representar o preço do componente, peso ou qualquer outra consequência de alocar o componente ao *design*. Assim, o problema de designar locais e magnitudes de redundância de componentes pode ser formulado como um programa matemático inteiro, segundo Nachlas (2017), buscando minimizar o custo do sistema sujeito a uma restrição de confiabilidade, ou maximizar a confiabilidade do sistema sujeito a uma restrição de orçamento.

A abordagem para resolver esse problema depende da configuração do sistema e pressupõe que se tenha uma expressão para a confiabilidade do sistema R_s . Seja m_i o número de cópias do componente i colocadas em paralelo na localização do componente i na

configuração do sistema, e c_i o custo unitário para o componente i . A representação do problema de *design* do sistema então busca minimizar o custo total enquanto atinge um nível-alvo de confiabilidade do sistema, ou maximizar a confiabilidade do sistema sujeito a um limite de orçamento total. Essa abordagem destaca como a redundância pode ser estrategicamente utilizada para melhorar a confiabilidade de um sistema, considerando os custos e benefícios associados (Nachlas, 2017).

O conceito de manutenção baseada na confiabilidade (RCM) alinha as estratégias de manutenção com os níveis de confiabilidade dos componentes. Este enfoque garante que a manutenção seja realizada de maneira eficaz, baseada na probabilidade de falha dos componentes (Almeida; Lima; Barbieri, 2022). A RCM tem se mostrado um método eficaz para a gestão da confiabilidade em sistemas mecatrônicos, focando na prevenção de falhas e na otimização da manutenção (Breneman; Sahay; Lewis, 2022).

A RCM é, também, uma abordagem estratégica crucial para a maximização da confiabilidade e eficiência operacional em sistemas mecatrônicos. Esta metodologia foca na identificação e prevenção de modos de falha potenciais antes que eles ocorram, com o objetivo de aumentar a disponibilidade dos sistemas e reduzir o tempo de inatividade. Para Nachlas (2017), através da análise funcional, a RCM ajuda a entender como os sistemas falham e quais são as consequências dessas falhas, permitindo o desenvolvimento de planos de manutenção proativos que são alinhados com os objetivos de segurança e eficiência operacional. Esta abordagem garante que a manutenção seja realizada apenas quando necessário, baseada em evidências reais de desempenho e condição dos equipamentos, o que leva a uma otimização dos recursos de manutenção e a uma redução dos custos operacionais.

A implementação da RCM em sistemas mecatrônicos, que são caracterizados por sua complexidade e integração de componentes mecânicos e eletrônicos, exige uma compreensão detalhada do comportamento e interações entre os componentes do sistema. Utilizando técnicas de monitoramento de condição e análises preditivas, a RCM permite a identificação precoce de sinais de degradação, possibilitando intervenções de manutenção mais eficazes e menos intrusivas. Essa abordagem não apenas melhora a confiabilidade e a eficiência operacional, mas também contribui para a extensão da vida útil dos equipamentos, a melhoria da segurança e a sustentabilidade através da redução de desperdícios e do uso eficiente de recursos. Portanto, a RCM representa uma metodologia chave para organizações que buscam excelência operacional e vantagem competitiva em setores que dependem fortemente de sistemas mecatrônicos avançados.

A análise de sistemas reparáveis também é vital na Engenharia Mecatrônica, na qual os modelos de manutenção são ajustados com base no histórico de falhas e reparos, proporcionando uma abordagem mais realista e eficiente para a manutenção (Smith, 2021).

Este tipo de análise é, segundo Nachlas (2017), particularmente interessante em casos em que a reparação não é instantânea. Nesses casos, parte-se de uma suposição de que o esforço de reparo varia dentro de um intervalo correlacionado e que a função de distribuição do esforço de reparo pertence à mesma família da distribuição de falhas, embora não haja justificativa para que as distribuições de falha e reparo sejam da mesma família. A razão para essa suposição é facilitar a análise. Para construir modelos de renovação para falhas com reparo não instantâneo, obtém-se a convolução entre os intervalos de operação e de reparo e, em seguida, a função de renovação baseada nessa convolução. Como a disponibilidade é a quantidade de interesse nesses casos, a função de renovação é utilizada para obter a função de disponibilidade. Isso considera um ciclo de longevidade como a soma de um intervalo de operação e um intervalo de reparo, cuja distribuição é obtida revertendo-se a função que acumula a probabilidade ao longo do tempo. Em outras palavras, usa-se um método matemático para calcular a probabilidade de eventos (como reparos) acontecerem, partindo do princípio de que sabemos a probabilidade acumulada desses eventos até um certo ponto.

Nesse sentido, a disponibilidade de um dispositivo em um momento específico depende se ele funcionou sem falhas até lá ou se foi consertado antes e também não falhou depois. A obtenção da função de disponibilidade, assim como sua inversão, apresenta um desafio significativo. A explicação sobre como falhas e tempos de reparo se relacionam, e como isso afeta a disponibilidade, é complexa e não permite simplificação direta. Calcular isso numericamente é complicado, mas é a única maneira prática de fazer (Nachlas, 2017).

O autor fornece a construção de um modelo de substituição por idade para os modelos de renovação bivariados. Modelos comparáveis para outros casos de manutenção preventiva ainda não foram definidos, mas podem ser construídos. Assim, a extensão dos modelos tradicionais de planejamento de manutenção univariada para aplicação em sistemas onde a longevidade é bivariada é apropriada e gerenciável (Nachlas, 2017).

As técnicas de monitoramento de condição, como análise de vibração e termografia, são também cada vez mais utilizadas em sistemas mecatrônicos para detectar sinais precoces de deterioração, permitindo intervenções de manutenção proativas para evitar falhas inesperadas (Scamati, 2020).

Técnicas de monitoramento de condições referem-se a métodos e práticas usados para avaliar continuamente o estado operacional e a saúde de máquinas, equipamentos ou sistemas

em tempo real. Essas técnicas são fundamentais na manutenção preditiva, permitindo a detecção precoce de falhas ou deteriorações antes que elas se tornem críticas. O objetivo é identificar mudanças na performance que possam indicar a necessidade de manutenção, reduzindo o tempo de inatividade não planejado e aumentando a eficiência operacional (Balthazar et al., 2021).

O monitoramento de condições envolve a coleta e análise de dados através de diversos sensores e instrumentos de medição, tais como análise de vibração, termografia, análise de óleo, ultrassom e monitoramento elétrico, entre outros. Esses dados são então analisados para identificar tendências que possam indicar problemas emergentes ou deterioração do equipamento. A partir dessa análise, é possível tomar decisões informadas sobre a manutenção necessária, otimizando o cronograma de manutenção e evitando falhas inesperadas (Abrahão, 2020).

Segundo Nachlas (2017), o monitoramento contínuo é um ponto chave quando se fala em monitoramento de condições, já que o processo de degradação subjacente é bem representado por um modelo de processo de difusão, onde a falha ocorre quando uma variável de estado do dispositivo ultrapassa um valor limiar. Outro aspecto relevante, é a manutenção preditiva, que conduz a duas classes de análise: uma em que o grau de deterioração pode ser observado diretamente (por exemplo, comprimento de uma fissura num processo de fadiga ou profundidade de sulco em desgaste de pneus) e outra em que o grau de deterioração não é diretamente observável (por exemplo, a extensão da oxidação em *displays* visuais baseados em arseneto de gálio ou o grau de esgotamento de metal em processos de eletromigração em circuitos integrados). Para casos em que a deterioração é observável, estratégias de aviso são definidas com base em observações diretas. Para casos em que a degradação não é observável, geralmente é identificado algum tipo de indicador substituto ou variável “marcador”.

Os processos de degradação, por sua vez, segundo o autor, podem ser observáveis ou não observáveis. Nos primeiros, é possível usar dados de testes de confiabilidade para fornecer um modelo de distribuição de vida para um dispositivo e usar a distribuição de vida residual correspondente como base para avisos de falha. Já nos segundos, utiliza-se uma variável marcadora observada para estimar a vida útil restante do dispositivo. Duas abordagens gerais são mais utilizadas: análise de séries temporais e construções baseadas em probabilidade condicional. A análise de séries temporais sugere que a progressão do processo de degradação de um dispositivo implicará numa mudança correspondente em uma medida de desempenho associada que pode ser observada, tratando-se, assim, a sequência de observações dessa medida de desempenho como uma série temporal (Nachlas, 2017).

Essas técnicas de monitoramento de condição são fundamentais para a implementação de estratégias de manutenção preditiva, permitindo a detecção precoce de falhas potenciais e a realização de manutenções de forma proativa para evitar falhas inesperadas e custosas.

A análise de modos de falha e efeitos (FMEA) é uma ferramenta crucial na identificação de potenciais pontos de falha em sistemas mecatrônicos. A FMEA auxilia na compreensão das implicações de falhas em componentes individuais e na implementação de medidas para mitigar riscos (Balthazar et al., 2021). Esta é uma metodologia sistemática para a análise de sistemas, produtos ou processos a fim de identificar potenciais modos de falha, suas causas e efeitos, priorizando-os com base na severidade, frequência e detecção para implementar ações corretivas.

Sistemas mecatrônicos frequentemente envolvem a integração de componentes mecânicos e eletrônicos. A confiabilidade destes sistemas depende não apenas da confiabilidade de componentes individuais, mas também de sua interação e integração (Abrahão, 2020).

A modelagem de sistemas reparáveis em mecatrônica é complexa, exigindo a consideração de estratégias de manutenção que podem alterar o estado de confiabilidade do sistema ao longo do tempo. Modelos como o processo de Poisson não homogêneo são frequentemente empregados neste contexto (Sarmento, 2019). Esse processo se aplica, em especial, no contexto de danos cumulativos. Ele começa com a premissa de que um dispositivo está sujeito a “choques” que ocorrem aleatoriamente no tempo. Cada choque impõe uma quantidade aleatória de dano ao dispositivo, que falha quando um limiar de capacidade ou resistência é ultrapassado. A realização mais comum deste modelo inclui a suposição de que os choques ocorrem de acordo com um processo de Poisson, com intensidade λ , e as quantidades de dano por choque são distribuídas de forma independente e idêntica, de acordo com alguma distribuição comum arbitrariamente selecionada, digamos H . Se $F(t)$ representa a confiabilidade ao longo do tempo e K é o número de choques que ocorrem no intervalo $[0, t]$, a função de confiabilidade baseada em um limiar L é descrita pela equação (1):

$$F(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^k}{k!} H(L)^k \quad (1)$$

Essa soma é feita sobre todos os números possíveis de choques, e a notação $H(y)^k$ representa a convolução k -vezes de $H(y)$, e assim a soma das magnitudes de dano que totalizam Y . Assim, a equação representa a probabilidade de que k choques ocorram e sua

soma não exceda o limiar de resistência/dano L , somada sobre todos os valores possíveis de k . Independentemente da escolha da distribuição para modelar as magnitudes dos choques, essa equação corresponderá a uma distribuição com taxa de falha crescente em média (Nachlas, 2017).

A análise de dados de falhas históricas é também fundamental para a modelagem estatística da confiabilidade. Estes dados são usados para calibrar modelos probabilísticos, que podem então prever comportamentos futuros de falhas em componentes mecatrônicos (Almeida; Lima; Barbieri, 2022).

Sobre a análise de dados de falhas históricas, Nachlas (2017) introduz o desenvolvimento de métodos estatísticos aplicáveis a dados de falha para sistemas reparáveis. Esses métodos permitem a estimativa dos parâmetros de modelos que descrevem padrões de falha, apesar de corresponderem a processos estocásticos em vez de distribuições de vida. Além disso, aborda tópicos como garantias, crescimento da confiabilidade, modelos de confiabilidade para componentes dependentes e a construção e uso de modelos de confiabilidade bivariada e multivariada.

A importância da modelagem de confiabilidade em sistemas mecatrônicos é reforçada pela complexidade e pela necessidade de precisão desses sistemas. A integração de componentes mecânicos, elétricos e de controle exige uma abordagem holística para garantir a confiabilidade. O desafio está em modelar a interdependência desses componentes e prever como as falhas em uma parte podem afetar o sistema como um todo (Ebeling, 2019).

O desenvolvimento de modelos de confiabilidade para sistemas mecatrônicos deve considerar a variação nas condições operacionais e ambientais. Essas condições podem afetar significativamente a taxa de falhas dos componentes, exigindo modelos que possam adaptar-se a diferentes cenários e prever a confiabilidade sob várias condições (Breneman; Sahay; Lewis, 2022).

A análise de confiabilidade em sistemas mecatrônicos também se beneficia do uso de simulações computacionais. Estas permitem a avaliação de cenários complexos e a identificação de pontos fracos nos sistemas, fornecendo dados valiosos para melhorias no *design* e na manutenção (Wolstenholme, 2018).

Nos sistemas mecatrônicos, a confiabilidade de *software* também é crucial. Com a crescente integração de sistemas controlados por *software*, é necessário avaliar como os erros de *software* podem levar a falhas de sistema e desenvolver estratégias para mitigar esses riscos (Smith, 2021).

A manutenção preditiva, que utiliza dados de monitoramento em tempo real e análises preditivas, está se tornando cada vez mais importante em sistemas mecatrônicos. A capacidade de prever falhas antes que ocorram pode reduzir significativamente o tempo de inatividade e os custos de manutenção (Balthazar et al., 2021).

Para Nachlas (2017), a manutenção preditiva é promissora para reduzir significativamente os custos de manutenção e aumentar a produtividade. A definição de formatos de políticas alternativas e a formulação e análise de modelos para selecionar políticas de manutenção preditiva são consideradas áreas emergentes e representam novas fronteiras importantes na pesquisa de planejamento de manutenção.

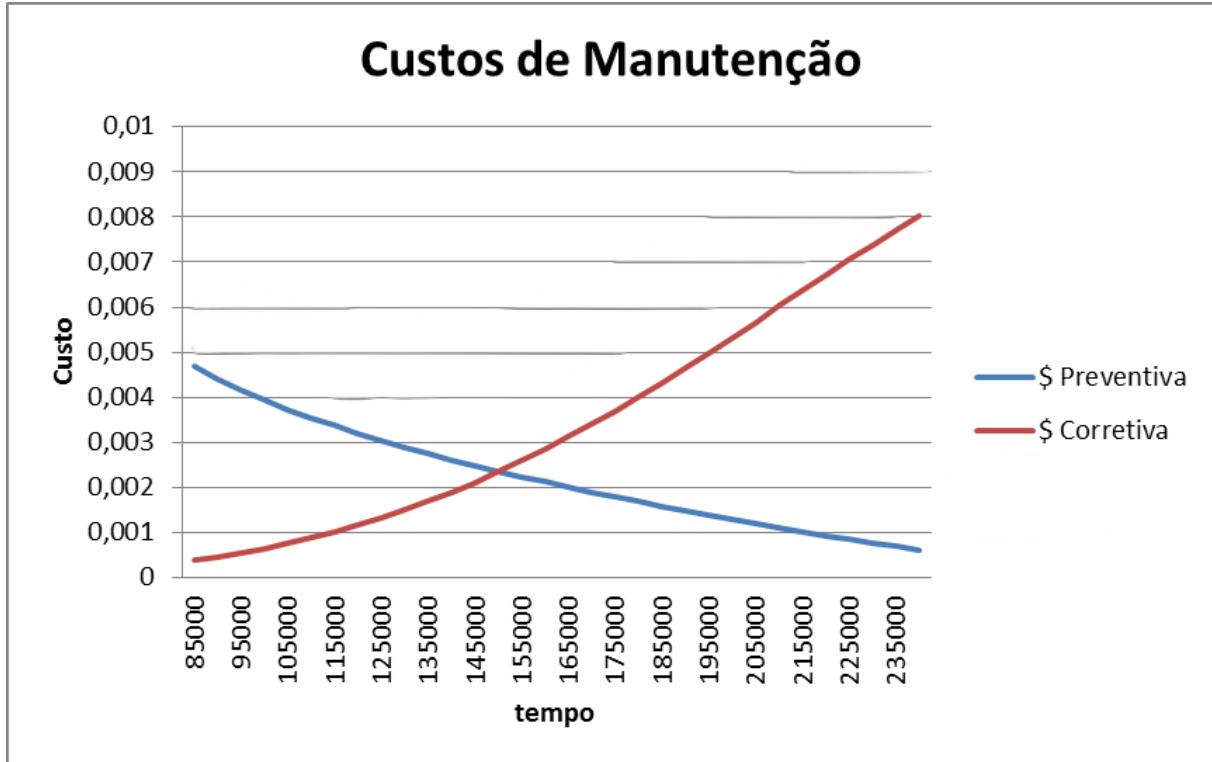
A confiabilidade de sistemas mecatrônicos também é afetada pela qualidade dos componentes utilizados. Estudos mostram que a seleção de componentes de alta qualidade e a realização de testes rigorosos durante a fase de *design* são essenciais para garantir a confiabilidade do sistema (Abrahão, 2020). Ademais, a confiabilidade pode ser melhorada através do *design* robusto de componentes e sistemas. Métodos de *design* robusto consideram a variabilidade nas condições operacionais e ambientais, visando minimizar a probabilidade de falha (Sarmento, 2019).

A otimização da confiabilidade em sistemas mecatrônicos envolve a análise de *trade-offs* entre custo, desempenho e confiabilidade. Decisões de *design* devem equilibrar esses fatores para atingir o nível desejado de confiabilidade sem custos proibitivos. Existem diversos métodos que podem ser adotados para assegurar a integração da confiabilidade em um produto. É essencial aplicar tais métodos o mais cedo possível, idealmente durante as fases iniciais de desenvolvimento do sistema, pois não existe alternativa para um projeto bem elaborado e meticulosamente planejado que considere os impactos de variados usos sob distintas condições ambientais (Sarmento, 2019).

A implementação de sistemas de gerenciamento de confiabilidade, que integram dados de várias fontes para monitorar e melhorar a confiabilidade, está se tornando uma prática padrão em muitas indústrias. Esses sistemas permitem uma melhor compreensão das falhas e ajudam a otimizar as estratégias de manutenção (Almeida; Lima; Barbieri, 2022).

A importância de métodos e técnicas de manutenção preditiva vão além do oferecimento de garantias de funcionamento pleno e contínuo dos sistemas mecatrônicos. A redução de custos operacionais e de despesas referentes às paradas de produção são aspectos de extrema relevância que justificam a implementação dessas técnicas de forma o mais eficiente possível.

FIGURA 3: GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE CUSTOS DE MANUTENÇÃO



FONTE: Ebeling, 2019.

A crescente tendência de digitalização e automação em sistemas mecatrônicos oferece novas oportunidades e desafios para a *Engenharia de Confiabilidade*. A integração de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT) e a Inteligência Artificial (IA) aos sistemas mecatrônicos abre caminho para avanços significativos no monitoramento e manutenção preditiva (Scamati, 2020).

A evolução da confiabilidade em sistemas mecatrônicos está diretamente ligada ao avanço tecnológico. Com o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias, os modelos de confiabilidade precisam ser constantemente atualizados. Sendo assim, a evolução tecnológica em componentes e sistemas mecatrônicos demanda uma revisão constante dos modelos de confiabilidade, assegurando que eles permaneçam relevantes e precisos diante de novos materiais, tecnologias e métodos de fabricação (Scamati, 2020).

É essencial, ainda, que a sustentabilidade e a confiabilidade sejam consideradas conjuntamente no *design* de sistemas mecatrônicos. A busca por sistemas energeticamente eficientes e de longa duração é essencial, não apenas do ponto de vista econômico, mas também para atender às crescentes demandas por práticas sustentáveis (Ebeling, 2019).

Um aspecto fundamental na Engenharia de Confiabilidade é o entendimento dos mecanismos de falha. A análise de falhas mecânicas, por exemplo, envolve o estudo de fadiga, corrosão e desgaste, que são críticos para componentes mecatrônicos sujeitos a estresses constantes (Melchers; Beck, 2018).

Nos sistemas mecatrônicos, a confiabilidade de componentes eletrônicos é muitas vezes avaliada através de modelos como o de Arrhenius, que relaciona a taxa de falha com a temperatura, vital para a gestão térmica eficaz (Gerasimou; Calinescu; Tamburrelli, 2018). Este modelo, segundo Nachlas (2017), permite calcular a confiabilidade de componentes ao longo do tempo, assumindo uma distribuição de vida de Weibull.

A Teoria da Confiabilidade se estende também ao domínio do *software*. A confiabilidade de *software* em sistemas mecatrônicos é avaliada considerando-se a probabilidade de falha livre de *software* durante um período de operação, um desafio em sistemas cada vez mais controlados por *software* (Ebeling, 2019).

A integração de sensores inteligentes e tecnologias de IoT em sistemas mecatrônicos oferece novas oportunidades para monitoramento em tempo real e manutenção preditiva, contribuindo significativamente para a melhoria da confiabilidade (Abrahão, 2020).

A confiabilidade de componentes mecatrônicos também pode ser melhorada através da engenharia de fatores humanos, considerando como os operadores interagem com os sistemas. Essa abordagem ajuda a reduzir erros operacionais que podem levar a falhas (Xu; Saleh, 2021).

O uso de técnicas de aprendizado de máquina na predição de falhas de componentes mecatrônicos tem ganhado destaque. Essas técnicas permitem análises mais precisas e previsões de falhas com base em grandes conjuntos de dados (Kabir; Papadopoulos, 2018).

A aplicação da teoria de redes complexas na análise da confiabilidade de sistemas mecatrônicos igualmente oferece uma nova perspectiva na compreensão da interdependência e da vulnerabilidade dos componentes dentro de um sistema (Balthazar et al., 2021).

A implementação de sistemas de gestão de ativos digitais está se tornando uma prática cada vez mais comum na indústria, permitindo uma melhor rastreabilidade e gestão da confiabilidade dos componentes ao longo do seu ciclo de vida (Abrahão, 2020).

As técnicas de otimização multiobjetivo são aplicadas na Engenharia de Confiabilidade para equilibrar as necessidades de desempenho, custo e confiabilidade em sistemas mecatrônicos (Sarmento, 2019).

A incorporação de simulações de Monte Carlo na Engenharia de Confiabilidade permite a análise detalhada da influência de variáveis aleatórias e incertezas no desempenho dos sistemas mecatrônicos (Almeida; Lima; Barbieri, 2022).

A adoção de práticas de engenharia sustentável na concepção de sistemas mecatrônicos tem um impacto positivo na confiabilidade, contribuindo para a criação de sistemas mais duráveis e ecologicamente corretos (Scamati, 2020).

Finalmente, a *Engenharia de Confiabilidade* em sistemas mecatrônicos é essencial na era da Indústria 4.0, em que a integração de tecnologias avançadas, como a Internet das Coisas e a Inteligência Artificial desempenham um papel crucial na otimização da manutenção e no aumento da eficiência operacional (Ebeling, 2019).

3.1.2 APLICABILIDADE DA TEORIA DA CONFIABILIDADE EM COMPONENTES MECATRÔNICOS

A Teoria da Confiabilidade em sistemas mecatrônicos transcende os limites teóricos, encontrando aplicação prática em uma variedade de campos, desde a indústria automotiva até sistemas médicos avançados. Esta teoria não é apenas um conjunto de modelos e conceitos abstratos; ela desempenha um papel crucial na vida real, assegurando a segurança, eficiência e durabilidade de sistemas complexos. Ao aplicar a Teoria da Confiabilidade na prática, engenheiros são capazes de prever e mitigar falhas, otimizar manutenções e melhorar o desempenho geral dos sistemas. Os exemplos a seguir demonstram a vasta gama de aplicações da Teoria da Confiabilidade em vários setores, ilustrando sua importância fundamental na engenharia de sistemas mecatrônicos e destacando o impacto direto que esses conceitos têm no mundo real.

Na indústria automotiva, por exemplo, a confiabilidade é crítica, especialmente nos sistemas de segurança. A aplicação de modelos de confiabilidade em componentes como freios ABS e sistemas de controle de estabilidade é vital para garantir a segurança dos veículos em diversas condições operacionais (Leite, 2018).

Em robótica, a confiabilidade dos sistemas mecatrônicos é essencial para assegurar a precisão e a eficácia dos robôs em ambientes de produção. A análise de confiabilidade ajuda a prever e prevenir falhas que podem levar a interrupções caras e até acidentes (Gonçalves, 2018).

No setor aeroespacial, a confiabilidade dos sistemas mecatrônicos é crucial devido às altas consequências de falhas. Modelos de confiabilidade são aplicados em sistemas de navegação e controle de voo para garantir a segurança e a eficiência das aeronaves (Breneman; Sahay; Lewis, 2022).

No campo da medicina, equipamentos mecatrônicos como máquinas de ressonância magnética e equipamentos de diagnóstico dependem fortemente da confiabilidade para garantir resultados precisos e segurança do paciente (Wolstenholme, 2018).

Sistemas de energia renovável, como turbinas eólicas e painéis solares, também se beneficiam da aplicação de modelos de confiabilidade. Estes modelos ajudam a otimizar a manutenção e a melhorar a eficiência e a vida útil desses sistemas (Smith, 2021).

A indústria de telecomunicações depende da confiabilidade dos sistemas mecatrônicos para garantir a comunicação contínua. Modelos de confiabilidade são aplicados a equipamentos de rede para minimizar o tempo de inatividade e garantir a entrega de serviços ininterruptos (Melchers; Beck, 2018).

Em sistemas de transporte ferroviário, a confiabilidade é crucial para a segurança e a eficiência operacional. A modelagem de confiabilidade é usada para manter a integridade dos sistemas de sinalização e controle, essenciais para evitar acidentes (Gerasimou; Calinescu; Tamburrelli, 2018).

Na indústria de processamento, a confiabilidade dos sistemas mecatrônicos é fundamental para garantir a continuidade da produção. Modelos de confiabilidade ajudam a prever falhas em sistemas de automação e controle de processos (Ebeling, 2019).

Em sistemas de defesa, a confiabilidade é crítica para a eficácia operacional. Modelos de confiabilidade são aplicados a sistemas de armas, veículos militares e equipamentos de comunicação para garantir a prontidão e a eficácia em situações críticas (Balthazar et al., 2021).

Na gestão de instalações, a confiabilidade dos sistemas de automação e controle de edifícios é essencial para manter a funcionalidade e o conforto. Modelos de confiabilidade são utilizados para otimizar a manutenção de sistemas de HVAC, iluminação e segurança (Abrahão, 2020).

Estes exemplos ilustram como os conceitos e modelos de confiabilidade são fundamentais em diversos setores, reforçando a importância desta área na Engenharia Mecatrônica e destacando a necessidade de continua pesquisa e desenvolvimento para melhorar a confiabilidade em sistemas complexos.

3.2 MODELOS REALISTAS DE MANUTENÇÃO EM SISTEMAS REPARÁVEIS

A manutenção em sistemas mecatrônicos reparáveis requer uma abordagem holística que considere a interação complexa entre componentes mecânicos, eletrônicos e de *software*. Modelos de manutenção eficientes devem levar em conta não apenas a probabilidade de falha de componentes individuais, mas também a natureza dinâmica e interconectada dos sistemas, permitindo uma abordagem mais precisa da manutenção (Balthazar et al., 2021).

A manutenção preditiva ou baseada na condição representa uma estratégia proativa, utilizando sensores e análises em tempo real para prever falhas. Esse método é particularmente vantajoso em sistemas mecatrônicos, em que a detecção precoce de problemas pode evitar falhas catastróficas e minimizar o tempo de inatividade, garantindo uma operação mais eficiente e segura (Abrahão, 2020).

Modelos realistas de manutenção em sistemas reparáveis são essenciais para garantir a confiabilidade e eficiência de sistemas mecatrônicos. Estes modelos consideram a natureza dinâmica e interconectada dos sistemas, permitindo uma abordagem mais precisa da manutenção (Balthazar et al., 2021).

Segundo Vaccaro (1997), não é apropriada a prática de substituir sistemas que falham por novos, mas sim estender sua vida útil através de manutenções periódicas. Este processo pode envolver a substituição seletiva de partes com taxas de falha crescentes ou que se tornaram obsoletas. A formação de um novo sistema a partir da substituição de um subsistema requer considerações especiais sobre os parâmetros utilizados.

Para realizar essa substituição seletiva, é preciso 1) recalcular e reanalisar a tendência das taxas de falhas dos componentes remanescentes, considerando apenas a porção restante de sua vida útil; 2) replanejar a política de manutenção dos componentes remanescentes com base na nova vida operacional pretendida para o sistema; 3) identificar componentes remanescentes com altas taxas de falha para possível substituição posterior; 4) conhecer a confiabilidade e a manutenibilidade previstas para as novas partes; 5) analisar conjuntamente as distribuições de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade dos componentes novos e antigos para obter uma previsão da tendência global de comportamento do novo sistema e 6)

usar dados de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade para avaliar o impacto em termos de custos da manutenção do novo sistema (Vaccaro, 1997).

Essas informações devem ser armazenadas em um sistema de informações para facilitar a visualização da tendência dos dados de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, incluindo considerações sobre desgaste e obsolescência. Uma política de manutenção deve levar em conta essas informações para planejar substituições baseadas em análises de confiabilidade, visando identificar e prever a necessidade e a viabilidade de novas manutenções (Vaccaro, 1997).

A adoção de políticas de manutenção preditiva em sistemas mecatrônicos reparáveis é cada vez mais comum. Essas políticas utilizam tecnologias avançadas de monitoramento e análise de dados para prever quando a manutenção é necessária, evitando assim manutenções excessivas e custos operacionais desnecessários, ao mesmo tempo que garantem a confiabilidade do sistema (Sarmento, 2019).

Modelos de processos de renovação e reparo minimalista abordam a realidade dos sistemas mecatrônicos, considerando o efeito das intervenções de manutenção no desempenho geral do sistema. Estes modelos ajudam a entender melhor a relação entre a frequência de manutenção e a confiabilidade, permitindo ajustes mais precisos nas estratégias de manutenção (Almeida; Lima; Barbieri, 2022).

A integração de técnicas de aprendizado de máquina com a análise de dados de manutenção representa um avanço significativo, proporcionando diagnósticos mais precisos e previsões de falhas. Estes sistemas de Inteligência Artificial são capazes de analisar grandes volumes de dados de sensores, identificando padrões que podem indicar a iminência de uma falha (Scamati, 2020).

Modelos de manutenção baseados na confiabilidade são cruciais em sistemas mecatrônicos, em que a falha de um único componente pode ter efeitos desastrosos. Esses modelos levam em consideração a probabilidade de falha ao longo do tempo, permitindo a criação de um plano de manutenção focado nas necessidades específicas de cada componente e do sistema como um todo (Ebeling, 2019).

A manutenção baseada na confiabilidade (RCM) se concentra em estratégias que consideram a criticidade dos componentes e a probabilidade de falha, assegurando que os recursos de manutenção sejam alocados de forma eficiente. Este tipo de manutenção identifica as atividades de manutenção mais críticas para a integridade e segurança do sistema. Esta abordagem analisa a criticidade dos componentes e prioriza a manutenção com base na

importância de cada um para a operação do sistema, assegurando que os recursos de manutenção sejam alocados eficientemente (Smith, 2021).

A análise de dados históricos de manutenção pode revelar padrões e tendências que são fundamentais para o desenvolvimento de modelos de manutenção mais eficazes em sistemas reparáveis (Scamati, 2020).

A implementação de sistemas de gerenciamento de ativos digitais em modelos de manutenção oferece uma ferramenta robusta para rastrear e gerir componentes ao longo de seu ciclo de vida. Esta abordagem melhora a tomada de decisão sobre manutenções e substituições, otimizando a confiabilidade e a eficiência operacional (Breneman; Sahay; Lewis, 2022).

A manutenção oportunística é uma estratégia que busca aproveitar as oportunidades para realizar manutenções preventivas ou corretivas em momentos convenientes, reduzindo o impacto no funcionamento geral do sistema. Este enfoque é especialmente útil em sistemas mecatrônicos, em que várias funções e componentes estão interligados e a interrupção de um pode afetar a operação total (Wolstenholme, 2018).

A manutenção autônoma, que representa a fronteira da tecnologia em sistemas reparáveis, é uma área emergente na qual os sistemas mecatrônicos são capazes de diagnosticar e executar ações corretivas de forma independente. Esta abordagem inovadora promete transformar o campo da manutenção, aumentando a eficiência e a confiabilidade de sistemas complexos, oferecendo um alto nível de automação e inteligência na detecção e resolução de problemas (Melchers; Beck, 2018).

Modelos de manutenção devem ser flexíveis para se adaptar às mudanças nas condições operacionais, materiais e tecnológicas. A adaptabilidade é chave para manter a eficácia da manutenção em sistemas dinâmicos e evolutivos (Ebeling, 2019).

Modelos de manutenção também devem considerar aspectos econômicos, equilibrando custo e benefício para garantir que as estratégias de manutenção sejam não apenas eficazes, mas também economicamente viáveis (Niu et al., 2021).

A gestão de ativos digitais em sistemas reparáveis oferece um meio de acompanhar o histórico de manutenção e desempenho dos componentes, auxiliando na tomada de decisões informadas sobre manutenção e substituições (Zhu et al., 2020).

A engenharia de fatores humanos na manutenção de sistemas reparáveis é importante para compreender como as interações entre operadores e sistemas podem influenciar a confiabilidade e a necessidade de manutenção (Xu; Saleh, 2021).

Qualquer que seja o modelo utilizado para mensurar a confiabilidade do sistema, é essencial que essa mensuração ou estimativa seja feita também da forma mais confiável possível. Para tanto, há métodos de estimativa de confiabilidade de sistemas que são essenciais para se ter o máximo de garantia.

Vaccaro (1997) descreve seis métodos para estimativa da Confiabilidade de Sistemas: Método da Decomposição, Método da Determinação de *Tie-Sets*, Método de *Cut-Sets*, Tabela Booleana, Simulação de Monte Carlo e Método de Discretização da Confiabilidade.

3.2.1 MÉTODO DA DECOMPOSIÇÃO

O Método da Decomposição é um procedimento analítico que envolve a decomposição recursiva de um sistema em termos de probabilidades condicionais. Este método começa com a identificação de componentes chave que dividem o sistema em subsistemas mais simples. A probabilidade de operação do sistema é então decomposta em probabilidades condicionais que são determinadas pelas probabilidades de operação e de não operação desses componentes chave (Vaccaro, 1997).

De maneira formal, o método consiste em escolher um componente essencial, chamado X. A confiabilidade desse componente, em um momento específico t, é representada pela fórmula $R(X(t))$. O componente X pode estar em um de dois estados: funcionando corretamente ou falhando (não funcionando). A confiabilidade do sistema R, nesse mesmo instante t, é dada pela soma das probabilidades condicionais de operação e não operação do componente chave, multiplicadas por suas respectivas confiabilidades (Vaccaro, 1997).

Para ilustrar a aplicação deste método, o documento apresenta um exemplo em que o sistema é dividido com base no estado operacional de um componente chave, resultando em diferentes subsistemas. A confiabilidade do sistema em um dado instante t é calculada combinando a confiabilidade desses subsistemas, levando em consideração o estado do componente chave. Este método permite estimar corretamente a confiabilidade de um sistema, mesmo que um componente seja impropriamente considerado chave, destacando a importância da escolha e análise de componentes chave em sistemas complexos (Vaccaro, 1997).

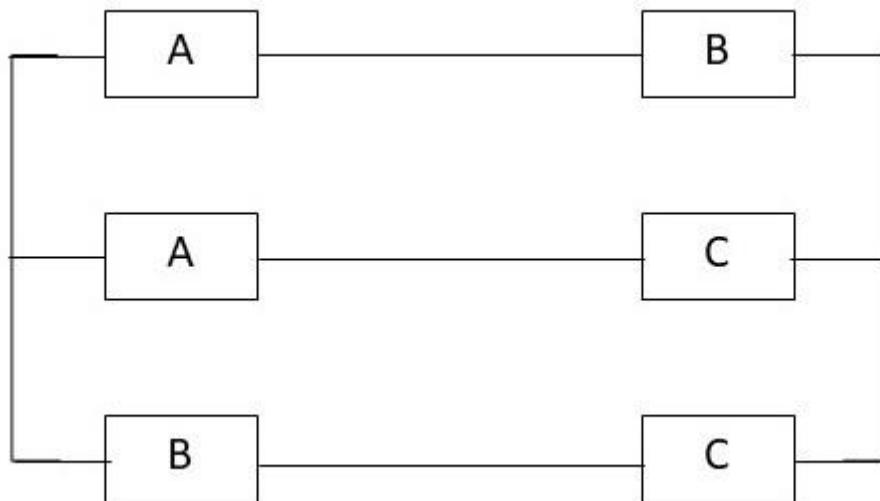
3.2.2 MÉTODO DA DETERMINAÇÃO DE *TIE-SETS*

O Método da Determinação de *tie-sets* define um *tie-set* como um conjunto de componentes que estabelece um caminho garantindo a operação do sistema, ou como um caminho completo através do diagrama de blocos que representa o sistema. Este método é baseado na probabilidade de que pelo menos um *tie-set* esteja operacional, assegurando assim a funcionalidade do sistema (Vaccaro, 1997).

De maneira formal, o método é descrito pela identificação de k *Tie-Sets* dentro de um sistema. Sendo $T = \text{tempo}$, T_i representa a duração do i -ésimo *tie-set*, então a confiabilidade do sistema R em um dado tempo t é dada pela probabilidade de que pelo menos um desses *tie-sets* esteja operacional:

$$R(t) = P((T_1 \geq t) \cup (T_2 \geq t) \cup \dots \cup (T_k \geq t)) \quad (2)$$

FIGURA 4: MÉTODO TIE-SETS



Fonte: elaboração própria.

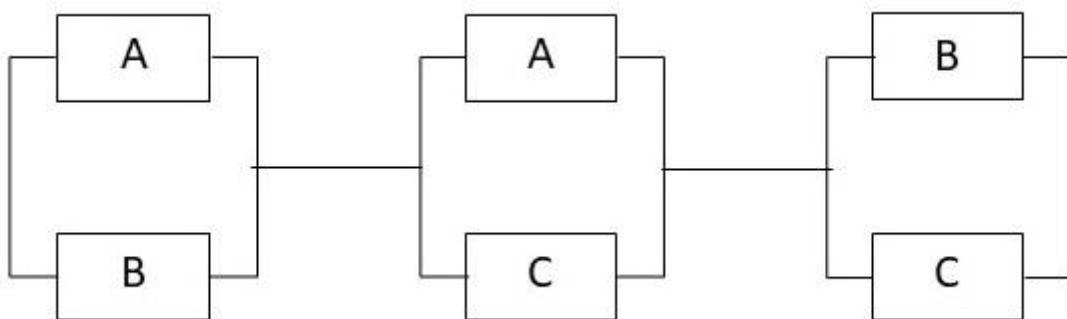
3.2.3 MÉTODO DE CUT-SETS

O Método de Determinação de *cut-sets* é definido por Vaccaro (1997) como um processo que identifica conjuntos de componentes cuja remoção ou falha interromperia a operação do sistema, levando à sua inoperância. Este método baseia-se na ideia de que a probabilidade de falha do sistema é influenciada pela probabilidade de ocorrência de pelo menos um desses *cut-sets*. Formalmente, se um sistema possui k *cut-sets* identificados, sendo $C=$ *cut set*, e C_i representa a duração do i -ésimo *cut-set*, então a confiabilidade do sistema R em um determinado tempo t é expressa pela fórmula:

$$R(t) = P((C_1 \leq t) \cup (C_2 \leq t) \cup \dots \cup (C_k \leq t)) \quad (3)$$

Isso implica que a confiabilidade do sistema é o complemento da probabilidade de que qualquer um dos *cut-set* socorra até o tempo t. Ao aplicar este conceito, identifica-se os conjuntos de componentes críticos cuja falha comprometeria todo o sistema, e então calcula-se a confiabilidade do sistema com base na não ocorrência dessas combinações de falhas (Vaccaro, 1997).

FIGURA 5: MÉTODO CUT-SETS



Fonte: elaboração própria.

3.2.4 TABELA BOOLEANA

O Método da Tabela Booleana é destacado como particularmente apropriado para aplicação computacional. Este método analítico baseia-se no conceito do espaço amostral, que envolve determinar todas as possíveis combinações de estados operacionais dos componentes

de um sistema e, em seguida, estimar a confiabilidade do sistema para todos os eventos nos quais o sistema permanece operacional (Vaccaro, 1997).

Neste método, cada componente do sistema é considerado em dois estados possíveis: operacional (1) ou não operacional (0), criando um procedimento exaustivo que examina todas as possibilidades de funcionamento do sistema. A confiabilidade de cada evento é calculada multiplicando-se as confiabilidades ou as probabilidades acumuladas de falha de cada componente, dependendo se estão operacionais ou não (Vaccaro, 1997).

A confiabilidade total do sistema, em um determinado instante, é então determinada pela soma das confiabilidades de todas as possibilidades em que o sistema é considerado operacional. Este método pressupõe que todos os componentes do sistema possuem comportamentos de falha independentes entre si e ao longo do tempo (Vaccaro, 1997).

Para ilustrar uma possível aplicação da Tabela Booleana nesse caso, pode-se ter em mente o seguinte modelo em que o sistema é considerado operacional (indicado por 1 na coluna “Sistema Operacional”) se ao menos dois componentes estiverem operacionais. Caso contrário, o sistema é considerado não operacional (indicado por 0):

FIGURA 6: TABELA BOOLEANA

Componente A	Componente B	Componente C	Sistema Operacional
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Fonte: elaboração própria

Esta tabela lista todas as possíveis combinações de estados operacionais para os componentes (0 para falha e 1 para operacional) e indica se o sistema está operacional ou não. Neste exemplo, considera-se o sistema operacional se pelo menos dois dos três componentes estiverem operacionais.

3.2.5 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

A técnica de Simulação pelo Método de Monte Carlo consiste em criar modelos que imitam situações do mundo real, baseando-se em um conjunto específico de suposições. Essa abordagem tem sido utilizada em diversos contextos, desde a elaboração de maquetes físicas até a realização de simulações de batalhas. No entanto, com o desenvolvimento e a disseminação da tecnologia de computadores digitais, essa técnica evoluiu significativamente. Agora, é possível simular cenários muito mais detalhados e complexos, abrangendo desde a análise de estresse e fadiga em componentes mecânicos e eletrônicos até o acompanhamento de flutuações no mercado de câmbio(Vaccaro, 1997).

O procedimento de simulação de Monte Carlo envolve a geração de vários conjuntos de valores de variáveis aleatórias, com base em distribuições de probabilidade conhecidas, e ao final do processo gera uma série de resultados para as variáveis que estamos interessados em observar ou medir. Essas variáveis, conhecidas como "variáveis de resposta", são essencialmente os efeitos ou saídas que resultam das condições ou ações aplicadas no estudo ou experimento, que podem ser analisadas estatisticamente. Este método é particularmente útil quando soluções analíticas fechadas são impossíveis ou impraticáveis de obter, seja devido à complexidade, custo ou necessidade de simplificações que poderiam comprometer a precisão dos resultados (Vaccaro, 1997).

A simulação de Monte Carlo é benéfica na estimativa da confiabilidade de sistemas, especialmente aqueles com configurações complexas, pois oferece soluções aproximadas da solução analítica exata com menor custo computacional. Para realizar a simulação, é necessário conhecer os componentes do sistema e suas distribuições probabilísticas de falha, bem como a estrutura do sistema, ou seja, como os componentes estão conectados. Isso permite criar um modelo de simulação que reflete a lógica de operação sobre os dados aleatórios de entrada (Vaccaro, 1997).

Entre as vantagens do Método de Monte Carlo estão a capacidade de obter estimativas e previsões diretamente do modelo computacional sem a necessidade de montagem física do

sistema inteiro e a flexibilidade para testar o impacto de alterações no modelo, como a substituição de um componente por outro (Vaccaro, 1997).

3.2.6 DISCRETIZAÇÃO DA CONFIABILIDADE

O Método de Discretização da Confiabilidade é uma abordagem determinística e sistemática alternativa ao processo de simulação para a estimativa da confiabilidade de sistemas. Este método é particularmente adequado para aplicações computacionais e envolve determinar valores característicos de confiabilidade para o sistema com base em sua configuração e nos modelos de confiabilidade de seus componentes (Vaccaro, 1997). O procedimento pode ser descrito nas seguintes etapas essenciais: 1) Determinação da Estimativa de Tempo; 2) Discretização do Intervalo de Tempo; 3) Obtenção dos Valores de Confiabilidade; 4) Definição de Valores Característicos de Confiabilidade; 5) Estimação de Tempos Característicos (Vaccaro, 1997).

Este método fornece uma abordagem sistemática para a estimativa da confiabilidade de sistemas complexos, permitindo a análise detalhada da confiabilidade com base na configuração do sistema e na confiabilidade de seus componentes (Vaccaro, 1997).

Todos os métodos descritos possibilitam uma visão mais assertiva e acurada do processo de confiabilidade em sistemas mecatrônicos e, consequentemente, têm potencial para embasar a tomada de decisões acerca de manutenções que podem impactar na gestão dos custos operacionais e na redução do tempo de parada de produção.

3.3 ESTRATÉGIAS INTEGRADAS DE MANUTENÇÃO

Estratégias integradas de manutenção em sistemas mecatrônicos complexos exigem uma abordagem multidisciplinar, combinando conhecimentos de Engenharia Mecânica, Eletrônica e de Controle. Essas estratégias visam melhorar a confiabilidade e eficiência operacional através da aplicação de métodos avançados, como a manutenção preditiva e a análise de dados em tempo real (Balthazar et al., 2021).

A manutenção preditiva, que utiliza dados de sensores e algoritmos de aprendizado de máquina, permite a identificação precoce de potenciais falhas. Esta abordagem reduz o tempo

de inatividade e prolonga a vida útil dos componentes, garantindo a operação contínua e eficiente dos sistemas mecatrônicos (Abrahão, 2020).

A integração da Internet das Coisas (IoT) na manutenção de sistemas mecatrônicos permite o monitoramento remoto e em tempo real do desempenho dos equipamentos. Esta tecnologia facilita a coleta de dados vitais para a manutenção preditiva e a tomada de decisão baseada em dados (Sarmento, 2019).

Estratégias de manutenção devem considerar a modularidade dos sistemas mecatrônicos, permitindo a substituição ou atualização de módulos específicos sem afetar o funcionamento geral do sistema. Esta abordagem melhora a eficiência e a adaptabilidade do sistema à evolução tecnológica (Almeida; Lima; Barbieri, 2022).

A implementação de sistemas de gerenciamento de ativos digitais é fundamental para rastrear o histórico de manutenção e desempenho dos componentes. Essa prática melhora a precisão das previsões de manutenção e otimiza a gestão de recursos (Scamati, 2020).

A confiabilidade dos sistemas mecatrônicos também é melhorada através do *design* robusto, que considera a variabilidade nas condições operacionais e ambientais. Projetar sistemas para suportar uma ampla gama de condições operacionais reduz a probabilidade de falhas (Ebeling, 2019).

A manutenção baseada na confiabilidade (RCM) é uma estratégia que alinha as ações de manutenção com os riscos associados às falhas de componentes. Este método garante que os esforços de manutenção se concentrem nas áreas mais críticas para a operação do sistema (Breneman; Sahay; Lewis, 2022).

A análise de modos de falha e efeitos (FMEA) é uma ferramenta chave na identificação de potenciais falhas em sistemas mecatrônicos. A FMEA ajuda a desenvolver estratégias de manutenção focadas na mitigação de riscos identificados (Wolstenholme, 2018).

A sustentabilidade é um aspecto crescentemente importante nas estratégias de manutenção. A adoção de práticas sustentáveis na manutenção de sistemas mecatrônicos não só melhora a eficiência operacional, mas também contribui para a redução do impacto ambiental (Smith, 2021).

4 CONCLUSÃO

Constatou-se que a Teoria da Confiabilidade é intrinsecamente ligada à eficácia dos sistemas mecatrônicos. A integração de modelos probabilísticos na análise e previsão de falhas fornece uma base sólida para a implementação de estratégias de manutenção mais eficientes, reduzindo o risco de falhas inesperadas e aumentando a vida útil dos componentes.

Foi visto que os métodos de manutenção avançados, especialmente a manutenção preditiva, desempenham um papel fundamental na manutenção de sistemas mecatrônicos reparáveis. A utilização de dados de monitoramento em tempo real, aliada a técnicas de aprendizado de máquina, permite uma identificação precoce de potenciais falhas, otimizando o tempo de resposta e reduzindo custos operacionais.

Notou-se que a aplicação prática desses conceitos e métodos varia significativamente entre diferentes setores. Desde a indústria automotiva até a medicina, a confiabilidade dos sistemas mecatrônicos afeta diretamente a segurança e a eficiência. Em cada contexto, a adaptação e a aplicação de modelos de confiabilidade e manutenção devem considerar as especificidades operacionais e ambientais.

Concluiu-se que a implementação eficaz de estratégias de manutenção baseadas na confiabilidade é um equilíbrio delicado entre custo, desempenho e confiabilidade. Decisões de *design* e manutenção precisam ser tomadas com uma compreensão clara do impacto a longo prazo, considerando tanto a sustentabilidade quanto a eficiência operacional.

Constatou-se também que a evolução tecnológica contínua nos sistemas mecatrônicos implica a necessidade de modelos de confiabilidade dinâmicos e adaptáveis. A indústria 4.0 e a crescente digitalização oferecem novos desafios e oportunidades para a *Engenharia de Confiabilidade*, destacando a importância de pesquisa e desenvolvimento contínuos nesta área.

Foi visto que, em resposta à pergunta problema, qual seja “Como os conceitos da Teoria da Confiabilidade e os métodos avançados de manutenção podem ser aplicados para melhorar a confiabilidade e a eficiência de sistemas mecatrônicos reparáveis?”, os conceitos da Teoria da Confiabilidade e os métodos avançados de manutenção podem ser aplicados com sucesso para melhorar a confiabilidade e a eficiência de sistemas mecatrônicos reparáveis. Essa aplicação é evidenciada na capacidade de prever e mitigar falhas, otimizar estratégias de manutenção e garantir a segurança e eficiência dos sistemas.

Notou-se que a abordagem holística, que integra análise de confiabilidade, manutenção preditiva e considerações de *design*, é essencial para alcançar os objetivos de confiabilidade e eficiência. A interdisciplinaridade entre Engenharia Mecatrônica, Ciência de Dados e Inteligência Artificial surge como um campo promissor para futuras pesquisas e desenvolvimentos nesta área.

Concluiu-se que o objetivo deste trabalho foi alcançado, oferecendo uma visão mais clara sobre como a Teoria da Confiabilidade e métodos avançados de manutenção podem ser aplicados para melhorar sistemas mecatrônicos reparáveis. Para trabalhos futuros, sugere-se a exploração de tecnologias emergentes, como a IoT e IA, em modelos de confiabilidade e manutenção, além de estudos de caso específicos em setores industriais variados.

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, Fernando Teixeira Mendes. **Processo De Seleção De Componentes Aeronáuticos Candidatos A Impressão 3d Para Reparos De Danos De Combate Em Aeronaves.** 2020. Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

ALBERTI, Alexandre Ramalho. Modelos para apoio à avaliação de políticas de manutenção para sistemas de proteção. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

ALMEIDA, Julio Cézar; DE LIMA, Key Fonseca; BARBIERI, Renato. **Elementos de máquinas: Projeto de sistemas mecânicos.** Editora Blucher, 2022.

BALTHAZAR, José Manoel et al. **Sistemas dinâmicos e mecatrônicos-Volume 1: Teoria e aplicação de controle.** Editora Blucher, 2021.

BONI, Henrique Svizzero. Avaliação da segurança de fundações em estacas escavadas de pequeno diâmetro na região de Bauru/SP. Dissertação (Mestrado)– Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018.

BRENEMAN, James E.; SAHAY, Chittaranjan; LEWIS, Elmer E. **Introduction to reliability engineering.** John Wiley& Sons, 2022.

EBELING, Charles E. **An introduction to reliability and maintainability engineering.** Waveland Press, 2019.

GERASIMOU, Simos; CALINESCU, Radu; TAMBURRELLI, Giordano. Synthesis of probabilistic models for quality-of-service *software engineering*. **Automated Software Engineering**, v. 25, p. 785-831, 2018.

GIACON JUNIOR, Admir José. **Análise probabilística da estabilidade de taludes via Teoria da Confiabilidade.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Bauru, 2018.

GONÇALVES, Guilherme Fernandes. *Engenharia de Confiabilidade* aplicada em sistemas de energias renováveis. 2018. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Energias Renováveis) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

LEITE, Leonardo Ripoll Tavares. Confiabilidade informacional: a filosofia da informação e o desenvolvimento da leitura crítica no ambiente virtual. 2018. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Humanas e da Educação, Programa de Pós-Graduação em Gestão de Unidades de Informação, Florianópolis.

MELCHERS, Robert E.; BECK, André T. **Structural reliability analysis and prediction.** John Wiley& Sons, 2018.

NACHLAS, Joel A. **Reliability Engineering: Probabilistic Models and Maintenance Methods.** 2.ed. CRC Press. Boca Ratón, NY, 2017.

SANTOS et al. **Aplicação da engenharia da confiabilidade na manutenção de sistemas reparáveis:** uma revisão sistemática da literatura. XLII encontro nacional de engenharia de produção ” Contribuição da Engenharia de Produção para a Transformação Digital da Indústria Brasileira ”. Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, 04 a 07 de outubro de 2022.

SANTOS, Bruna Luíza Pinto. Modelos probabilísticos de confiabilidade aplicados à performance de manutenção de equipamentos de grande porte de uma mineradora brasileira. 2023. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2023.

SARMENTO, David Marques. Análise do processo de planejamento de necessidades, compras e estoque de componentes eletrônicos, utilizados para protótipos, pequenos e médios lotes de produção de placas eletrônicas: caso da empresa Produza S/A. **Engenharia de Produção-Pedra Branca**, 2019.

SCAMATI, Vagner. Como as tecnologias são incorporadas na educação e os seus potenciais ganhos na relação ensino/aprendizagem por meio da teoria da carga cognitiva. **Revista Espacios**, v. 41, n. 44, 2020.

SMITH, David J. **Reliability, maintainability na drisk: practical methods for engineers**. Butterworth-Heinemann, 2021.

VACCARO, Guilherme Luis Roehe. Modelagem e análise da confiabilidade de sistemas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.

WOLSTENHOLME, Linda C. **Reliability modelling: a statistical approach**. Routledge, 2018.