



RAFAEL MOREIRA RIBEIRO

PROPOSTA DE UMA ÁRVORE DE CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE FALHA

Lavras – MG

2023

RAFAEL MOREIRA RIBEIRO

PROPOSTA DE UMA ÁRVORE DE CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE FALHA

Artigo apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica para obtenção do título de Bacharel.

Dr. Filipe Augusto Gaio de Oliveira

LAVRAS – MG

2023

RAFAEL MOREIRA RIBEIRO

**PROPOSTA DE UMA ÁRVORE DE CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE FALHA
PROPOSAL FOR A CRITERIA TREE FOR FAILURE ANALYSIS**

Artigo apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica para obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 12 de dezembro de 2023

Dr. Filipe Augusto Gaio de Oliveira - UFLA

Dr. Carlos Eduardo Castilla Alvarez – UFLA

Dr. Joelma Rezende Durão Pereira – UFLA

Dr. Henrique Leandro Silveira - UFLA

Dr. Filipe Augusto Gaio de Oliveira

LAVRAS – MG

2023

RESUMO

A análise de falhas é um processo investigativo que busca compreender as causas de eventos indesejados, visando aprimorar a confiabilidade e eficiência de diversos equipamentos. A ausência de um compêndio consolidado de critérios para iniciar investigações, presente na literatura, dificulta a criação de um modelo unificado. Este estudo objetiva compilar artigos sobre o tema, propondo, com base nos motivos identificados, uma árvore de critérios para otimizar o tempo na tomada de decisões. Utilizando a base Web of Science, foram revisados estudos de caso voltados para a engenharia, catalogando-os quanto à natureza preventiva ou corretiva e ao critério aplicado para a análise. O desfecho da pesquisa resultou na criação de uma árvore de critérios, dividida entre corretiva e preventiva. No contexto das intervenções corretivas, os critérios abordados foram falhas catastróficas, taxa de falhas e falhas relacionadas ao fator de vida. No âmbito preventivo, destacaram-se os critérios de simulação e inspeções. Além disso, foram estabelecidas relações entre os critérios identificados, os indicadores de performance e as sugestões presentes na literatura.

Palavras chave: Estratégia, Manutenção, Prevenção, Falhas, Critérios de análise.

ABSTRACT

Failure analysis is an investigative process that seeks to understand the causes of undesirable events, aiming to enhance the reliability and efficiency of various equipment. The absence of a consolidated compendium of criteria to initiate investigations, as found in the literature, hinders the creation of a unified model. This study aims to compile articles on the subject, proposing, based on identified reasons, a tree of criteria to optimize decision-making time. Using the Web of Science database, case studies focused on engineering were reviewed, cataloging them according to preventive or corrective nature and the criterion applied to the analysis. The research outcome resulted in the creation of a tree of criteria, divided between corrective and preventive. In the context of corrective interventions, the criteria addressed were catastrophic failures, failure rate, and failures related to the life factor. In the preventive realm, criteria such as simulation and inspections were highlighted. Additionally, relationships were established among the identified criteria, performance indicators, and suggestions found in the literature.

Keywords: Strategy, Maintenance, Prevention, Failure, Analysis criteria.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linha do tempo de indicadores de performance.....	10
Figura 2 - Quantitativo de artigos por setor definido do Web of science.	21
Figura 3 - Filtros para Seleção de Artigos	22
Figura 4 - Análise de palavras chave dentre os artigos.....	22
Figura 5 - Quantidade de publicações e citações por ano.	23
Figura 6 - Quantitativo de países com mais publicações sobre o tema.....	23
Figura 7 - Proposta de Árvore de Critérios	29

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	6
1. INTRODUÇÃO	6
2. REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1. MANUTENÇÃO	7
2.2. ANÁLISE DE FALHA	8
2.3. INDICADORES DE PERFORMANCE	8
2.4. CONFIABILIDADE E ACOMPANHAMENTO DE FALHAS	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
SEGUNDA PARTE – ARTIGO	16
ARTIGO 1 - PROPOSTA DE UMA ÁRVORE DE CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE FALHA	16
1. INTRODUÇÃO	17
2. METODOLOGIA	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
3.1. SELEÇÃO DE ARTIGOS:	21
3.2. ABORDAGEM QUANTITATIVA DE ARTIGOS	22
3.3. GRUPOS DE CLASSIFICAÇÃO	25
3.3.1. Agrupamento Corretivo	25
3.3.1.1. Agrupamento Falhas Catastróficas	26
3.3.1.2. Agrupamento Taxa de Falhas	27
3.3.1.3. Agrupamento por Fator de Vida	27
3.3.2. Agrupamento Preventivo	28
3.3.2.1. Agrupamento Simulação por Ensaios	28
3.3.2.2. Agrupamento de Inspeções	28
3.4. ÁRVORE DE CRITÉRIOS	28
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

A indústria passou por três grandes revoluções. De acordo com Gomes e Pereira (2022), uma quarta fase surge com a adição de indústrias autônomas. Nahavandi (2019) destaca, a indústria 5.0 surge como uma resposta à necessidade de elevar a produtividade sem excluir os seres humanos, enfatizando, assim, a importância da interação entre homem e máquina no contexto industrial. Correlatas às eras da indústria e após a Segunda Guerra Mundial, surgem a mecanização e uma preocupação crescente com a produtividade. Nesse contexto, iniciam-se os estudos sobre a manutenção de equipamentos, que podem ser divididos em três grandes grupos: a corretiva, a preventiva e, por fim, a preditiva. Vale ressaltar que as categorias de manutenção não são exclusivas, mas sim complementares.

A partir desse conceito de produtividade, as indústrias buscam reduzir os estoques. Nesse contexto, uma parada de produção é indesejada, pois resulta em grandes gastos e perdas diretas de clientes. Assim, quando ocorre um ou mais eventos com perda de produção, é acionada uma análise de falha. O objetivo dessa análise é estudar os eventos subsequentes à parada de produção e buscar soluções para tratar a causa raiz do problema. O início de uma análise de falha é determinado por critérios específicos estabelecidos por cada empresa, levando em consideração as necessidades e os impactos gerados na produção. Isso pode incluir, por exemplo, a definição de limites temporais, como duas horas de impacto produtivo, um dia de impacto produtivo, ou avaliação da qualidade do material gerado, como produção fora das especificações desejadas das peças. Essa abordagem personalizada permite que as empresas ajam de maneira eficiente e eficaz diante de eventos corretivos, minimizando os impactos negativos na produção (VIDEIRA; OLIVEIRA, 2020).

Com base nessas análises, é possível elaborar critérios adicionais para evitar falhas prematuras nos equipamentos. Estes podem ser personalizados de acordo com os padrões identificados nos indicadores de desempenho, permitindo uma abordagem mais proativa na manutenção preventiva e na redução do risco de paradas. A integração de análises de indicadores de desempenho e processos na estratégia de manutenção contribui para uma gestão mais eficiente e orientada por dados, visando a otimização da confiabilidade e do desempenho dos ativos industriais (BROWN; DINIZ, 2017).

A discussão proposta pelo presente trabalho aborda a definição destes critérios, uma vez que não existe um padrão, mas sim uma recomendação literária. Isso deixa a cargo da empresa a definição desses critérios. A intenção é oferecer orientações às empresas na formulação de seus próprios critérios, analisando os potenciais impactos de desempenho que podem estar intrínsecos nos indicadores (BARAN, 2011).

Ao investigar os estudos de caso, é possível identificar padrões e tendências nas práticas adotadas pelas indústrias em relação aos critérios para manutenção preventiva ou corretiva. Essa abordagem prática e baseada em casos reais pode fornecer uma base sólida para a definição de critérios mais eficientes e adaptados às necessidades específicas de diferentes setores ou tipos de equipamentos na indústria. Essa revisão da literatura permitirá uma compreensão mais aprofundada das práticas adotadas ao longo desta

década, proporcionando conceitos valiosos para aprimorar a eficiência das estratégias de manutenção preventiva e corretiva. Ao buscar padrões e tendências nos conceitos de critérios e nas metodologias de análise de falha, este estudo visa contribuir para a perspectiva de melhoria contínua dos processos de gestão de ativos industriais.

Para isso, serão apresentados os métodos de priorização comumente empregados na indústria para a análise de falhas, destacando exemplos concretos provenientes de estudos de caso. Adicionalmente, os artigos mais significativos publicados na área de análise de falhas serão organizados. Uma revisão da literatura sobre os critérios empregados em estudos de caso envolvendo intervenções corretivas será conduzida, buscando estabelecer correlações entre os artigos que compartilham tais critérios para análises tanto corretivas quanto preventivas. Além disso, será realizada uma análise para relacionar os tipos de indicadores de desempenho com os critérios utilizados nas avaliações de falhas. Esses objetivos visam proporcionar uma compreensão aprofundada dos métodos de priorização na análise de falhas, promovendo uma visão abrangente e organizada do cenário atual de estudos e práticas na indústria.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A falha, conforme a NBR-5462 de 1994, ocorre quando um ativo deixa de executar a função requerida. Após a ocorrência da falha, surge a pane, que representa o estado de incapacidade do ativo em desempenhar a função necessária. Adicionalmente, o conceito de defeito refere-se ao desvio de uma das características do equipamento em relação ao cumprimento de seus requisitos. Dois outros conceitos importantes são a confiabilidade, que denota a capacidade do ativo em desempenhar sua função sob condições específicas durante um intervalo de tempo, e a manutenibilidade, que se refere à capacidade do equipamento de ser mantido e colocado em condições de operação (ABNT, 1994).

Com base nesses conceitos, o referencial será dividido em três seções: a primeira abordando a evolução da manutenção, a segunda relacionada à análise de falhas, e a terceira focada nos indicadores de performance.

2.1. MANUTENÇÃO

A manutenção pode ser categorizada em quatro gerações distintas. A primeira geração, que se encerra ao final da Segunda Guerra Mundial, é caracterizada por uma abordagem reativa, onde a indústria não buscava altas produtividades, sendo denominada como manutenção corretiva. Nesse contexto, a intervenção ocorre em resposta a uma falha, visando corrigir o erro identificado (KARDEC; NASCIF, 2013).

Com o advento da Segunda Guerra Mundial, as grandes indústrias perceberam a necessidade de aumentar a produtividade para fornecer mais recursos às suas tropas. Nesse contexto, as grandes empresas iniciaram o desenvolvimento da mecanização dos processos. Diante disso, as paradas corretivas começaram a causar impacto significativo, levando ao surgimento da manutenção preventiva. Esta abordagem utiliza o planejamento de intervalos de tempo como fator de intervenção, visando prevenir falhas antes que ocorram, contribuindo assim para um aumento na eficiência e redução de paradas não programadas (SHIGUNOV; SCARPIM, 2023).

Em um terceiro momento, por volta dos anos 70, com o avanço das linhas de produção e a redução dos estoques, a indústria tornou-se mais vulnerável a paradas não programadas. Nesse contexto, surgiram as manutenções preditivas. Essa abordagem acompanha o ativo por meio de parâmetros de condição e, com esse monitoramento contínuo, prevê a necessidade de intervenção somente quando necessário. Essa mudança representou uma evolução significativa na gestão da manutenção, permitindo uma abordagem mais proativa e eficiente para garantir a operação contínua dos equipamentos (CORRÊA; CORRÊA, 2004).

Na quarta geração de manutenção, a preocupação está centrada na saúde do ativo. Essa abordagem introduz o conceito de disponibilidade, que mede o tempo em que o equipamento está pronto para utilização. Além disso, incorpora a manutenibilidade, estabelecendo a relação com a complexidade envolvida na manutenção do ativo, e a confiabilidade, que é o estudo abrangente dos parâmetros de manutenção para garantir a segurança e a eficiência operacional. Essa geração representa uma abordagem mais holística, visando não apenas a prevenção de falhas, mas também a promoção da efetividade e durabilidade do ativo ao longo do tempo (ZONTA et al., 2019).

2.2. ANÁLISE DE FALHA

A análise de falha, é uma investigação lógica e planejada com o objetivo de evidenciar e analisar um ativo que apresenta falha ou que está propenso a falhar. Essa abordagem visa identificar e analisar o mecanismo da falha para encontrar a causa raiz do evento. Durante a análise, o analista prescreve possíveis causas e examina suas consequências, conduzindo estudos para determinar o fator principal que levou ao evento. O propósito final da análise de falha é eliminar a reincidência do evento, garantindo a confiabilidade do ativo, e sugerir novas medidas corretivas para abordar efetivamente a causa raiz. Essa metodologia é crucial para aprimorar a gestão de ativos e contribuir para a eficiência operacional, garantindo que as falhas sejam compreendidas, corrigidas e prevenidas no futuro (ALMEIDA; PINHO; LEAL, 2005).

Com o avanço da tecnologia, observa-se uma significativa transformação nas análises de falhas proporcionada por softwares computacionais. Isso viabiliza o desenvolvimento detalhado de peças e a realização de estudos preventivos para evitar eventos indesejados. Contudo, novos desafios surgem quando se trata dos materiais aplicados. A substituição de materiais em veículos automotivos, visando suportar cargas mais elevadas e atingir melhor desempenho, é uma tendência em evidência. Entretanto, as falhas em materiais permanecem como uma realidade cotidiana, demandando que se compreenda a mecânica da fratura e os modos de falha associados. Dessa forma, a narrativa das falhas continua sendo expressa através do material, ressaltando a importância do conhecimento contínuo e aprimorado nesse campo para assegurar a segurança e a confiabilidade dos componentes (PELLICCIONE, 2014).

2.3. INDICADORES DE PERFORMANCE

Os indicadores de manutenção têm a finalidade de auxiliar os engenheiros durante suas tomadas de decisões, como por exemplo, a frequência de manutenções preventivas a serem realizadas em um determinado equipamento. Três destes indicadores são o Tempo Médio para Reparo (MTTR), Tempo Médio Entre Reparos (MTBF) e a Disponibilidade Física (DF), que são explicados a seguir. O objetivo dos indicadores é de priorizar as ações para as manutenções preventivas (XENOS, 2014).

Tempo Médio Entre Reparos

Se as falhas em um equipamento ocorrem regularmente ou de forma desordenada, o indicador MTBF (Tempo médio entre reparos) torna-se crucial na análise realizada pelo engenheiro de confiabilidade. O MTBF é utilizado para a criação ou manutenção de planos sistemáticos, uma vez que esses planos têm a função de prevenir ou prever as falhas. O MTBF fornece uma estimativa do tempo médio entre as ocorrências de falhas, o que permite aos engenheiros de confiabilidade entenderem a confiabilidade do equipamento. Se as falhas estão ocorrendo regularmente, um MTBF baixo indica que o equipamento está sujeito a interrupções frequentes, sugerindo a necessidade de planos de manutenção preventiva mais robustos para aumentar a confiabilidade e reduzir as falhas. Por outro lado, se as falhas são esporádicas e o MTBF é alto, pode ser possível ajustar os planos de manutenção para otimizar os recursos sem comprometer a confiabilidade (CORDEIRO; ASSUMPCÃO, 2016).

Tempo Médio Para Reparo

O tempo médio para reparo (MTTR) é, de fato, um indicador crucial no contexto da manutenção, pois fornece uma média do tempo que a equipe de manutenção leva para corrigir uma falha no equipamento. É importante ressaltar que, em situações em que há uma pressão significativa para resolver rapidamente um problema, pode ocorrer o risco de não se abordar a causa raiz, resultando em intervenções corretivas adicionais na máquina. A análise desse indicador sugere que quanto maior for o tempo de reparo, maior deve ser a criticidade atribuída ao equipamento. Por outro lado, se o reparo for rápido e efetivo, possivelmente devido a estratégias de engenharia, deve-se considerar a possibilidade de reduzir o número e a intensidade dos planos de manutenção. Essa abordagem permite uma gestão mais eficiente dos recursos de manutenção, equilibrando a necessidade de rápida resolução de problemas com a busca pela eliminação das causas raízes para garantir uma manutenção mais eficaz e duradoura (FOGLIATTO; DUARTE, 2009).

Disponibilidade Física (DF)

Além do MTTR e MTBF, a disponibilidade do equipamento para a produção é crucial. Esse conceito é encapsulado pelo indicador Disponibilidade Física (DF), que é expresso como a porcentagem de tempo entre a hora calendário (HC), o total de horas em que a máquina está em operação no mês, e a hora de manutenção (HM), a soma das horas em que o ativo está em processo de manutenção (MUCHIRI; PINTELON; LUDO, 2011).

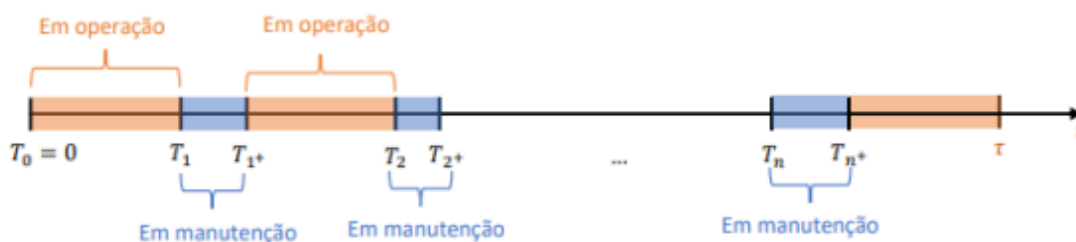
Sua equação é definida como:

$$DF = \frac{(HC-HM)}{HC} \text{ VERIFICAR}$$

A Figura 1 pode ser utilizada para exemplificar os indicadores de performance. Sendo assim, a média de tempo em intervalos em operação é o indicador MTBF. Já a média de tempo em intervalos em manutenção é o indicador MTTR, por fim o tempo total da linha subtraído do somatório de tempos de em manutenção e dividido pelo tempo total,

vai resultar no indicador de disponibilidade física (ALCÂNTARA; PEREIRA; SILVA; LIMA, 2022).

Figura 1-Linha do tempo de indicadores de performance.



Fonte: Nascimento; Silva; Alcantra; Augusto; Pereira, (2022).

No cenário atual, a aplicação de indicadores de desempenho na indústria manufatureira representa uma abordagem essencial para garantir confiabilidade e eficiência operacional. Alvarez e Rodriguez (2022) destacam a relevância desses indicadores na elaboração de estratégias de manutenção, enquanto Hwang *et al.* (2021) os consideram como motivadores para a análise de falhas, proporcionando percepções sobre fatores que impactam o desempenho. Velmurugan, Venkumar e Sudhakarapandian (2021) utilizam indicadores como MTBF e MTTR para avaliar o desempenho em uma indústria de pneus, evidenciando a importância de parâmetros temporais. A abordagem estatística também ganha destaque com Kumar e Singh (2020), que combinam indicadores e métodos estatísticos para uma avaliação mais precisa. Kumar e Dhiman (2023) direcionam os indicadores de desempenho para máquinas de injeção de moldagem, enquanto Akhtar *et al.* (2023) exploram a comparação do desempenho de usinas eólicas por meio do indicador MTTR. Em conjunto, esses estudos refletem uma tendência crescente na aplicação diversificada de indicadores de desempenho, abrangendo setores distintos e proporcionando uma abordagem abrangente para a otimização operacional na indústria manufatureira.

2.4. CONFIABILIDADE E ACOMPANHAMENTO DE FALHAS

John Moubray (1991) realiza uma introdução ao conceito de Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), propondo uma abordagem sistemática para otimizar estratégias de manutenção, visando garantir a confiabilidade de sistemas complexos. O principal conceito da RCM é identificar e priorizar as atividades de manutenção com base na análise das funções do equipamento e nas consequências de sua falha. A RCM não segue uma abordagem "tamanho único", mas é um processo personalizado para cada sistema. Moubray enfatiza a importância de compreender as funções críticas do equipamento, analisar os modos de falha potenciais e selecionar estratégias de manutenção que otimizem o desempenho do sistema. O processo RCM de Moubray é orientado por sete perguntas fundamentais que guiam a análise, abordando aspectos cruciais como a função do item a ser mantido, as possíveis falhas que podem interferir em sua operação, as causas subjacentes a essas falhas, as consequências de sua ocorrência, a importância relativa de cada falha, estratégias de prevenção e ações a serem tomadas em caso de falha na prevenção. Ao responder a essas perguntas, a RCM proporciona a identificação de atividades de manutenção mais eficazes, eliminando práticas desnecessárias e reduzindo custos.

A abordagem da RCM tem sido amplamente adotada em diversas indústrias, contribuindo para a melhoria da confiabilidade, disponibilidade e desempenho de ativos, conforme demonstrado por Vidaurre et al. (2022). Neste estudo, o método foi aplicado para criar um novo plano de manutenção, resultando em uma redução significativa de 60,53% nas paradas corretivas dos equipamentos. Outra aplicação notável foi realizada por Santos (2022) em uma empresa alimentícia. Neste caso, a metodologia foi empregada com o objetivo de desenvolver um plano de manutenção para um equipamento novo que, anteriormente, dependia exclusivamente de manutenção corretiva.

Já Modarres (1999) ao oferecer uma abordagem prática, apresenta ferramentas analíticas que visam avaliar e aprimorar a confiabilidade em contextos de sistemas complexos. O autor destaca métodos quantitativos específicos para análise de risco, concentrando-se na aplicação prática dessas técnicas. Além disso, Modarres dedica-se à exploração de estratégias eficazes de gestão de riscos, com a finalidade de proporcionar orientações práticas para mitigar e gerenciar incertezas em sistemas críticos.

No contexto atual, a obra de Smith e Hinchcliffe, (2017) é destinada a uma abordagem quanto a sistemas elétricos em específico, para a análise de falhas em componentes eletrônicos, tais como variações na temperatura, estresse mecânico, interferências eletromagnéticas, entre outros fatores que podem influenciar negativamente a confiabilidade e o desempenho desses dispositivos. Ainda com foco em elétrica, mais voltada para energia os autores Teera-Achariyakul e Rerkpreedapong (2022) utilizam uma abordagem de taxa de falhas para determinar o plano de manutenção preventiva de alimentadores e assim aumentar a confiabilidade em seu fornecimento de energia.

Contribuições em métodos estatísticos aplicados à confiabilidade envolvem a utilização de técnicas estatísticas para avaliar e aprimorar a confiabilidade de sistemas e processos. Esses métodos desempenham um papel crucial na análise de dados de falhas, modelagem de distribuições de tempos entre falhas, previsão de vida útil de componentes e identificação de padrões de confiabilidade. Uma abordagem estatística específica, destacada na obra de Larry Crow (2018), é a distribuição de Weibull, amplamente empregada para modelar a taxa de falhas ao longo do tempo. A distribuição de Weibull é particularmente útil para descrever o comportamento de falhas ao longo da vida de um componente, permitindo a identificação de períodos de maior vulnerabilidade e auxiliando na implementação de estratégias de manutenção preventiva.

Parlikad (2019), em seus trabalhos, estabelece uma conexão crucial entre a gestão de ativos e o desempenho, visando aprimorar a confiabilidade nas práticas de manutenção. Ele destaca a importância de considerar as interdependências existentes entre os ativos, especialmente nas frotas, quando se trata de análise de falhas. Além disso, ele integra princípios estatísticos para analisar e interpretar dados de falhas, proporcionando uma base sólida para decisões informadas. Ao abordar as dependências entre os componentes e aplicar métodos estatísticos, ele correlaciona um estudo valioso para melhorar a eficiência operacional, identificando estratégias de manutenção preventiva e corretiva que considerem as relações entre ativos, contribuindo assim para a otimização da confiabilidade das operações.

Zonta *et al.* (2019) abordam o conceito de revolução tecnológica e indústria 4.0 com o processamento massivo de dados e produtos específicos. Para eles a capacidade de prever a manutenção de ativos no futuro é essencial, e a manutenção preditiva contribui significativamente para melhorar o tempo de inatividade, custos e qualidade da produção. Porém, observa-se uma lacuna nas pesquisas da Indústria 4.0, que geralmente se concentram em análise de dados e aprendizado de máquina, negligenciando métodos de manutenção preditiva. Em seu artigo é destacada a crescente presença da ciência da computação nesse contexto, ressaltando a importância de uma abordagem multidisciplinar para enfrentar efetivamente os desafios da Indústria 4.0, quanto a manutenções preditivas.

Outros autores como Hoboken (2021) e Elsayed (2023) exploram diversos avanços recentes nas metodologias de engenharia de confiabilidade. Dentre eles inovações para o acompanhamento de processos com uso de softwares, o controle e monitoramento de processos multivariados, a integração do controle estatístico de processos e a nova versão da manutenção preditiva. Além disso, discutem as direções futuras para a engenharia de confiabilidade e a tecnologia. Outros autores como Dong *et al.* (2022), avaliam a aplicação de um robô para inspeções preditivas em subestações de energia. Já Wagg e Li (2022) e Yu e Tian (2022) utilizam algoritmos em formato de rede neural para determinar a confiabilidade de seus estudos de caso; com este estudo é possível determinar a taxa de falhas dos sistemas e agir de forma preventiva.

O estudo dos critérios para análise de falha desempenha um papel crucial na engenharia, oferecendo aos analistas um guia claro para o aprimoramento de estratégias de manutenção preventiva e corretiva. A ausência de um padrão definido na literatura destaca a necessidade de uma pesquisa mais detalhada nessa área. Estabelecer critérios consistentes não só contribui para a confiabilidade e disponibilidade de ativos industriais, minimizando períodos de inatividade e riscos de falhas, mas também facilita a tomada de decisões. A sistematização dos gatilhos promove uma comunicação eficiente entre diferentes setores da indústria, otimizando processos e maximizando o desempenho dos equipamentos.

REFEÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKHTAR, I; ALTAMIMI, A; KHAN, ZA; ALOJAIMAN, B; ALGHASSAB, M; KIRMANI, S. Reliability Analysis and Economic Prospect of Wind Energy Sources Incorporated Microgrid System for Smart Buildings Environment. IEEE ACCESS. 2023. Vol. 11. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3287832.

ALCÂNTARA, L.; PEREIRA, I.; SILVA, R.; LIMA, M. Análise de confiabilidade para a redução do número de manutenções corretivas nos caminhões off-highway. In: 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;

ALMEIDA, D. A.; PINHO, A. F.; LEAL, F. Proposta de um Modelo de Sistema de Informação para a Gestão do Conhecimento aplicado a Árvores de Falhas. In: SINCONEE – IV Seminário Nacional de Gestão da Informação e do Conhecimento no Setor de Energia Elétrica, 2005;

BARAN, L. Manutenção Centrada Em Confiabilidade Aplicada Na Redução De Falhas: Um Estudo De Caso. Monografia Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2011. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/23471/2/PG_CEGIPM_VII_2011_12.pdf . Acesso em: Ago. 2023;

BROWN, R. O.; DINIZ, C. C. C. Colheita Florestal e Manutenção de Equipamentos Móveis. In: Semana de Aperfeiçoamento em Engenharia Florestal UFPR, 1., 2017, Curitiba. Anais da SEAFLO. Curitiba: UFPR, 2017. p. 01-41;

CORDEIRO, J.C.; ASSUMPÇÃO, M.R., “Indicadores para gestão na manutenção corretiva.” *Exacta*, vol 14, núm 2, 2016, pp. 173-182, São Paulo, Brasil, DOI: 10.5585/ExactaEP.v14n2.5895;

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica. P. 660. São Paulo, Atlas, 2004;

CROW, L.H. Evaluating the reliability of repairable systems. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Pag. 275 – 279. 1990.

DONG, LJ; CHEN, NC; LIANG, JW; LI, TT; YAN, ZL; ZHANG, B. A Review Of Indoor-Orbital Electrical Inspection Robots In Substations. *Industrial Robot-The International Journal Of Robotics Research And Application*. Ind. Robot. Fev. 2023. Vol. 50. DOI: 10.1108/IR-06-2022-0162

FOGLIATTO, F.S.; DUARTE, J. L. Confiabilidade e manutenção industrial. Rio de Janeiro, RJ, Elsevier, 2009. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595154933/epubcfi>. Acesso em: Jul.2023;

GARCÍA, FJA; SALGADO, DR. Analysis of the Influence of Component Type and Operating Condition on the Selection of Preventive Maintenance Strategy in Multistage Industrial Machines: A Case Study. *Machines*. Suíça. Maio 2022. Vol. 10. DOI: 10.3390/machines10050385;

HWANG, J; SHWARTZ, L; WANG, Q; BATTA, R; KUMAR, H; NIDD, M. FIXME: Enhance Software Reliability with Hybrid Approaches in Cloud. *IEEE COMPUTER SOC*. 2021. DOI: 10.1109/ICSE-SEIP52600.2021.00032

KARDEC, A.; NASCIF, J. *Manutenção: Função Estratégica*. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2013;

KIM, Seunghyeon; WON, Yuchang; PARK, Kyung-Joon; EUN, Yongsoon. A Data-Driven Indirect Estimation of Machine Parameters for Smart Production Systems. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 10, pp. 6537-6546, 2022;

KUMAR, A; DHIMAN, P. Performance Analysis Of Injection Moulding Machine Under Fuzzy Environment Through Contemporary Arithmetic Operations On Right Triangular Generalized Fuzzy Numbers (RTrGFN). *Journal Of Intelligent & Fuzzy Systems*. Vol. 45. 2023. DOI: 10.3233/JIFS-224022;

KUMAR, S; SINGH, R. Rank Order Clustering And Imperialist Competitive Optimization Based Cost And RAM Analysis On Different Industrial Sectors. *Journal of manufacturing Systems*. Pg. 514 a 524. Jul. 2020. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.07.014;

MODARRES, M. *Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide*. Nova York: CRC Press, 1999.

MOSLEHA, A; CHANGA, Y. Model-based human reliability analysis: prospects and requirements. *Elservier. Reliability Engineering & System Safety*. 83. 2004.

MOUBRAY, J. *Manutenção Centrada na Confiabilidade*. Tradução de Heitor Takashi Kato. São Paulo: Aladon, 1991.

MUCHIRI, P.; PINTELON, L. G.; LUDO, M. H. Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. *International Journal Production Economics*, v. 131, p. 295 a 302, 2011;

NBR 5462. In: *Confiabilidade e manutenibilidade*. Rio de Janeiro: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas; 1994;

NAHAVANDI, S. Industry 5.0-A Human-Centric Solution, Sustainability, MDPI, agosto, 2019, DOI: 10.3390/su11164371;

PELLICCIONE, A. *Análise de falhas em equipamentos de processo: mecanismo de danos e casos práticos*. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 20 jul. 2023.

PEREIRA, I.; GOMES, C. Dos Primórdios Da Revolução Industrial A Indústria 4.0, *Recima21 - Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 3, n.11, 2022;

PETCHROMPO, S; Parlikad, A. A review of asset management literature on multi-asset systems, *Elservier, European Safety and Reliability Association*. 2019;

SANTOS, C. Aplicação Da Manutenção Centrada Na Confiabilidade Para Elaboração De Um Plano De Manutenção: Estudo Na Indústria Alimentícia. Caruaru. Universidade Federal De Pernambuco. Centro Acadêmico Do Agreste. Departamento De Engenharia De Produção. Curso De Engenharia De Produção. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/47765>. Acesso em: agosto de 2023;

SMITH, D.; HINCHCLIFFE, N. Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages. Chapman & Hall: Thomson Science, Springer, NY, 2017. DOI: 10.1007/978-1-4615-6029-6

SHIGUNOV, A; SCARPIM, J A. Terceirização em serviços de manutenção industrial. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 20 Jun. 2023;

TEERA-ACHARIYAKUL, N; RERKPREEDAPONG, D. Optimal Preventive Maintenance Planning for Electric Power Distribution Systems Using Failure Rates and Game Theory. *Energies*. Vol. 15. Jul. 2022. DOI: 10.3390/en15145172.

VELMURUGAN, K; VENKUMAR, P; SUDHAKARAPANDIAN, R. Performance Analysis of Tyre Manufacturing System in the SMEs Using RAMD Approach. *Hindawi LTD. Math. Probl. Eng.* Maio. 2021. DOI: 10.1155/2021/6616037;

VIDAURRE, J. PIO, M. REYES, R. QUISPE, G. Aumento de disponibilidad en equipos de una empresa de polímeros enfocado en el método RCM. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Información*. Ed. 52. Pag. 148 a 160. Perú. 2022.

VIDEIRA, A.; OLIVEIRA, G. Análise de Causa Raiz. RCA. Solução Definitiva para Problemas Crônicos. *WCM*, 2020;

WANG, QQ; LI, CB. Incident detection and classification in renewable energy news using pre-trained language models on deep neural networks. *Journal Of Computational Methods In Sciences And Engineering*. Vol. 22. 2022. DOI: 10.3233/JCM-215594.

XENOS, H. G. Gerenciando a manutenção produtiva: melhores práticas para eliminar falhas nos equipamentos e maximizar a produtividade. 2. ed. Nova Lima, MG: Falconi, 2014. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 20 Jul. 2023;

YU, X; TIAN, XS. A fault detection algorithm for pipeline insulation layer based on immune neural network. *Elsevier Sci Ltd. China*. Abril. 2022. Vol. 196. DOI: 10.1016/j.ijvpv.2022.104611

ZENG, ZG; BARROS, A; COIT, D. Dependent failure behavior modeling for risk and reliability: A systematic and critical literature review. *Reliability Engineering & System Safety*. França. Vol. 239. 2023. DOI: 10.1016/j.res.2023.109515

ZONTA, T; COSTA, C; RIGHI, R; LIMA, M; TRINDADE, E; LI, G. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Elservier. Computers & Industrial Engineering*. 2019.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO**ARTIGO 1 - PROPOSTA DE UMA ÁRVORE DE CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE FALHA**

PROPOSTA DE UMA ÁRVORE DE CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE FALHA**Rafael Moreira Ribeiro¹****Dr. Filipe Augusto Gaio de Oliveira**

¹rafael.ribeiro@estudante.ufla.br Universidade federal de Lavras, Trevo Rotatório
Professor Edmir Sá Santos, Lavras - MG, 37203-202

RESUMO

A análise de falhas é um processo investigativo que busca compreender as causas de eventos indesejados, visando aprimorar a confiabilidade e eficiência de diversos equipamentos. A ausência de um compêndio consolidado de critérios para iniciar investigações, presente na literatura, dificulta a criação de um modelo unificado. Este estudo objetiva compilar artigos sobre o tema, propondo, com base nos motivos identificados, uma árvore de critérios para otimizar o tempo na tomada de decisões. Utilizando a base Web of Science, foram revisados estudos de caso voltados para a engenharia, catalogando-os quanto à natureza preventiva ou corretiva e ao critério aplicado para a análise. O desfecho da pesquisa resultou na criação de uma árvore de critérios, dividida entre corretiva e preventiva. No contexto das intervenções corretivas, os critérios abordados foram falhas catastróficas, taxa de falhas e falhas relacionadas ao fator de vida. No âmbito preventivo, destacaram-se os critérios de simulação e inspeções. Além disso, foram estabelecidas relações entre os critérios identificados, os indicadores de performance e as sugestões presentes na literatura.

Palavras chave: Estratégia, Manutenção, Prevenção, Falhas, Critérios de análise.

1. INTRODUÇÃO

Na busca por incrementar a produtividade, a indústria atravessou diversas revoluções industriais, alterando fundamentalmente a forma como a produção era conduzida, evoluindo desde a mecanização até a automação industrial. O conceito de "Indústria 4.0" foi introduzido pela primeira vez na Feira de Hannover em 2011 e oficializado em 2013, com a indústria alemã liderando essa transição. A Indústria 4.0 representa uma nova era na fabricação, caracterizada pela integração de tecnologias digitais, internet das coisas e automação avançada para otimizar os processos industriais (Majstorovic; Mitrovic, 2019; Zhong, 2017). Nahavandi (2019) destaca que a Indústria 5.0 surge como resposta à necessidade de aumentar a produtividade sem excluir os seres humanos, destacando, assim, a importância da interação entre homem e máquina no contexto industrial.

Na busca por maior produtividade na indústria, a evolução da manutenção ao longo das gerações pode ser dividida em quatro fases distintas. Na primeira geração, após a Segunda Guerra Mundial, predominava a abordagem reativa da manutenção corretiva, onde as intervenções ocorriam em resposta a falhas identificadas. A segunda geração, impulsionada pela necessidade de aumentar a produtividade durante a Segunda Guerra, introduziu a manutenção preventiva, que planejava intervenções em intervalos de tempo para prevenir falhas e aprimorar a eficiência. Na terceira geração, nos anos 70, surgiu a manutenção preditiva, fundamentada no monitoramento contínuo de parâmetros de condição para prever intervenções apenas quando necessárias, adotando uma abordagem mais proativa (KARDEC; NASCIF, 2013). Por fim, a quarta geração, focada na saúde do ativo, incorpora os conceitos de disponibilidade, manutenibilidade e confiabilidade, visando não apenas prevenir falhas, mas também promover a efetividade e durabilidade do ativo ao longo do tempo (ZONTA et al., 2019).

Os indicadores de performance (KPIs) são introduzidos no contexto da manutenção, conectando-se aos conceitos de manutenibilidade e confiabilidade. A manutenibilidade representa a probabilidade de manter um equipamento operacional em um intervalo de tempo específico, enquanto a confiabilidade avalia a capacidade do ativo de permanecer em operação por um período determinado sem falhar (JIS Q, 2012). O tempo médio entre falhas (MTBF) é destacado como um indicador importante para equipamentos com falhas recorrentes ou ocasionais, calculado pela quantidade de horas trabalhadas dividida pelo número de intervenções corretivas (SINGH; MARKESSET, 2014). Esse indicador é utilizado na criação e manutenção de planos sistemáticos para prevenir ou prever falhas. Além disso, a Disponibilidade Física (DF) é apresentada como um indicador essencial que representa a proporção de tempo em que a máquina está em operação em relação ao tempo total, incluindo as horas de manutenção (ABNT, 1994). O número de intervenções corretivas (NIC) também é mencionado como um indicador frequentemente utilizado para iniciar análises de falhas, sendo aplicável a sistemas, componentes, itens ou equipamentos (PIETRUCHA, 2015; MADAVAN; BALARAMAN, 2016).

O conceito de falha em um ativo refere-se ao evento em que ele deixa de desempenhar sua função, desencadeando a necessidade de intervenção corretiva. Nesse contexto, a manutenção corretiva torna-se essencial para corrigir as falhas identificadas e restaurar o pleno funcionamento do ativo (ABNT, 1994). A análise de falhas, por sua vez, é um estudo abrangente realizado com o objetivo de avaliar eventos, tanto corretivos

quanto preventivos. Essa análise visa aprofundar-se na identificação das causas raízes subjacentes aos eventos, proporcionando uma compreensão mais completa dos motivos que levaram à falha. Ao compreender as origens dos problemas, é possível implementar tratativas adequadas para prevenir recorrências e otimizar a eficiência do sistema, seja por meio de melhorias nos procedimentos corretivos ou pelo desenvolvimento de estratégias preventivas mais eficazes. Dessa forma, a análise de falhas desempenha um papel crucial no aprimoramento contínuo da gestão de ativos e na busca por maior confiabilidade operacional (ALMEIDA; PINHO; LEAL, 2005).

Com o avanço dos estudos de manutenção e a busca incessante por produtividade, a identificação e correção de falhas tornaram-se desafios significativos, sendo a ação corretiva um dos principais pontos críticos. A realização de análises de falhas emerge como uma prática essencial para mitigar os impactos adversos decorrentes de falhas em ativos industriais. Apesar da vasta gama de abordagens sobre análise de falhas presentes na literatura, a falta de um compêndio consolidado de critérios para iniciar investigações dificulta a criação de um modelo unificado. Diversos autores propõem diferentes motivos para iniciar tais análises, falhas críticas ou graves, que impactam segurança, operação e resultados finais; Indicadores como padrões anormais, medições fora dos limites, mudanças no desempenho e ocorrências inesperadas também justificam análises aprofundadas. O histórico de manutenção, correlações com atividades de manutenção e feedback do usuário são critérios relevantes para avaliação e prevenção de recorrências. Ademais, a conformidade com exigências regulatórias é crucial para garantir conformidade legal e segurança operacional. Com isso uma multiplicidade de abordagens que, por sua vez, complica a tarefa dos analistas em encontrar um padrão para lidar com eventos de falha. Essa diversidade de perspectivas tem um impacto direto na tomada de decisões, influenciando, assim, a produtividade nas indústrias. (BOOKER, 2020).

Portanto, a presente pesquisa tem como escopo avaliar os artigos que abordam a análise de falhas, especialmente aqueles publicados a partir do período da indústria 4.0, com o intuito de identificar os principais motivos que conduzem à realização dessa análise. A metodologia adotada consistirá em uma revisão da literatura, na qual os critérios serão sistematicamente categorizados em grupos distintos, permitindo uma análise aprofundada dos mais recorrentemente empregados. Ao final, com base nos artigos selecionados e nos motivos identificados, será proposta uma árvore de critérios. Este estudo assume relevância significativa ao examinar de forma crítica os critérios usuais e sua aplicabilidade na rotina dos analistas, com o propósito de otimizar o tempo demandado para a tomada de decisões.

2. METODOLOGIA

As revisões da literatura têm como propósito orientar os leitores sobre um tema específico, conduzindo uma análise comparativa dentro de uma base de artigos e classificando objetivamente os mais citados em relação ao tratamento do problema de pesquisa. A revisão realizada por Boker et al. (2020) busca estabelecer um padrão para diagnosticar análises de falha, enquanto o trabalho de Carvalho et al. (2021) tem como meta identificar, entre os artigos mais citados, os modelos de gestão de excelência em qualidade mais frequentemente utilizados. As pesquisas são fundamentadas em artigos publicados em fontes confiáveis. Alguns autores como Saunders, Lewis, Thornhill (2009) e Rafael (2022), utilizam os acervos IEEE Xplore, SciELO e Google Acadêmicos, já outros autores optam a Web of Science por conter uma maior coleção de arquivos (CARVALHO; *et al.*, 2021).

Iniciando a abordagem do objetivo de conduzir a revisão de artigos voltados para a análise de causa raiz, o procedimento se inicia com a seleção criteriosa de artigos pertinentes ao tema proposto. Em seguida, realiza-se uma análise minuciosa dos dados dos artigos selecionados, aplicando critérios de seleção e exclusão previamente estabelecidos. Posteriormente, adota-se uma estratégia de fichamento no Excel, na qual os artigos são classificados de acordo com os critérios empregados. Por fim, é conduzida uma análise integrativa, que incorpora indicadores de performance e os principais critérios classificados, proporcionando uma exposição clara da relação direta entre eles.

Seleção de artigos

Na seleção dos artigos, decidiu-se optar pelo banco de dados da Web of Science, que oferece uma ampla variedade de periódicos, não se restringindo a um tema específico. Essa abordagem foi recomendada não apenas por Aguinis et al. (2004) e Almeida et al. (2021), mas também por outros autores. No contexto da pesquisa, foram examinados os resultados provenientes de diversas palavras-chave, as quais foram descritas em diferentes idiomas e no plural, conforme Tabela 1. Essa abordagem foi adotada com o intuito de assegurar a abrangência na identificação de artigos potencialmente relacionados ao tema. Nesse sentido, as palavras escolhidas para a busca foram: Análise e Falha.

Tabela 1 - Tabela de Tentativas de Palavras-Chave

Palavra Pesquisada	Idioma	Quantidade de Artigos
Análise e Falha	Inglês	26110
Falha	Português	1
Causa Raiz	Inglês	4802
Causa Fundamental	Inglês	9781

Fonte: O Autor (2023)

As palavras chaves foram descritas em inglês pois é o idioma mais utilizado em termos de escrita de artigos científicos. Assim, a taxonomia utilizada no Web of Science foi a de TI para pesquisa em títulos, OR para representar a alternativa entre um grupo de palavras e AND para a correspondência de duas ou mais palavras, o termo utilizado na busca foi:

(TI= ((Failure OR Failures) AND (Analysis OR Analyses)))

Para refinar as buscas foram utilizados filtros no próprio portal da Web of Science, o primeiro filtro foi relacionado ao período em análise de 2013 à 2023, baseado na evolução da indústria. Foi escolhido o tempo a partir do conceito de indústria 4.0 (PEREIRA; GOMES, 2022), essa escolha ocorre por dois motivos principais, o primeiro é a utilização de pesquisas modernas, e segundo com a revolução da indústria (CORDEIRO; ASSUMPÇÃO, 2016) existe um maior processamento de dados devido a automação dos equipamentos.

Outros filtros foram aplicados, incluindo a exclusão de artigos de revisão sistemática, acesso antecipado e provenientes de conferências. Essa decisão foi motivada pela intenção de direcionar o trabalho para artigos que efetivamente conduzem análises de falhas. Por fim, visando delimitar a pesquisa à área de estudo específica, foram utilizados filtros para categorias em Engenharia Mecânica e títulos de publicação relacionados à análise de falhas em engenharia.

Com base nos dados de 04 de julho de 2023, todos os dados fornecidos pelo Web of Science foram exportados para o Excel. Na aba "gravar conteúdo", foram selecionados

todos os pontos de pesquisa. Além disso, foram extraídos os arquivos por tabulações para análises futuras.

Análise de dados

Para uma análise de revisão bibliográfica, os autores utilizam o software VosViewer para estabelecer relações entre os artigos contribuindo para o direcionamento da análise. O software recebe uma base de dados e cria um mapa de calor ou uma malha de relações entre os artigos, podendo esta malha ser montada por exemplo com as palavras chaves dos resumos, em que os nós são as palavras e seu tamanho é a quantidade de citações, e as linhas são as relações entre as palavras em todos os artigos e sua espessura é quem representa a relação das palavras nos artigos (VAN ECK; WALTMAN, 2017).

O software Excel foi utilizado como apoio para o levantamento e organização de dados. Uma vez que os artigos foram novamente refinados aplicando o filtro em que dentre as palavras chaves está contido o termo; “Failure Analysis”. Esse termo foi utilizado por ser o mais presente dentre as palavras chaves dos artigos do banco de dados.

Para essa catalogação, uma leitura detalhada dos resumos foi conduzida, resultando na classificação dos artigos que permaneceriam na base de dados da pesquisa. Foram mantidos na pesquisa os artigos que tratavam de estudos de caso de falhas e estudos envolvendo simulações ou inspeções. Por outro lado, foram excluídos da pesquisa os artigos que abordavam falhas relacionadas a alvenaria, revisões, sugestões ou explicações de metodologias, bem como artigos que propunham sugestões de manutenção não embasadas em pesquisa.

Os artigos que permaneceram na planilha foram integralmente revisados com a finalidade de identificar os critérios empregados pelos respectivos autores, para isso foi utilizado o processo de fichamento de artigo. Esse processo possibilitou a classificação dos artigos em categorias de prevenção e correção, levando em consideração que o termo "análise de falhas" pode abranger a avaliação de uma possível falha, como é evidenciado pelo método dos elementos finitos, por exemplo (Shi et al., 2018). Ao final, os artigos de correção foram subdivididos em três grandes grupos: catastrófica, taxa de falha e fator de vida. Por sua vez, para a análise dos artigos de prevenção, foram destacados os principais temas abordados, sendo eles simulação e inspeção.

Indicadores

Os indicadores de desempenho serão discutidos em relação aos critérios, com o intuito de apresentar uma nova abordagem ao público interessado. O conceito e a utilização dos indicadores de performance (KPIs) são inseridos na manutenção junto aos conceitos de manutenibilidade e confiabilidade, ou seja, a probabilidade de se manter um equipamento dentro de um intervalo de tempo (JIS Q, 2012) e a avaliação do ativo permanecer em operação por um determinado tempo sem retornar ao estado de falha (ALCÂNTARA; *et al*, 2022).

Se as falhas em um equipamento estão com ocorrência recorrente ou de forma ocasional o indicador de tempo médio entre as falhas (MTBF) representará em seu valor, sendo assim o valor do indicador é encontrado com a quantidade de horas trabalhadas pelo equipamento dividida pela quantidade de atuações corretivas em um determinado período. Logo este tempo médio entre falha, é utilizado para a criação ou manutenção, de planos sistemáticos. Uma vez que os planos tem a função de prevenir ou prever as falhas (SINGH; MARKESET, 2014).

Além do MTBF, é fundamental que o equipamento esteja pronto para a produção. Esse requisito é contido pelo indicador chamado Disponibilidade Física (DF), o qual representa a proporção de tempo entre a hora calendário (HC) — que corresponde ao tempo total em que a máquina está em operação durante o mês — e a hora de manutenção (HM), que abrange a soma das horas dedicadas à manutenção do ativo. (ABNT, 1994).

Outro indicador utilizado no meio é o número de intervenções corretivas (NIC), ele pode ser definido por sistema, componente, item ou até mesmo por equipamento e frota, este número é muito utilizado para dar início a uma análise de falha (PIETRUCHA, 2015; MADAVAN; BALARAMAN, 2016).

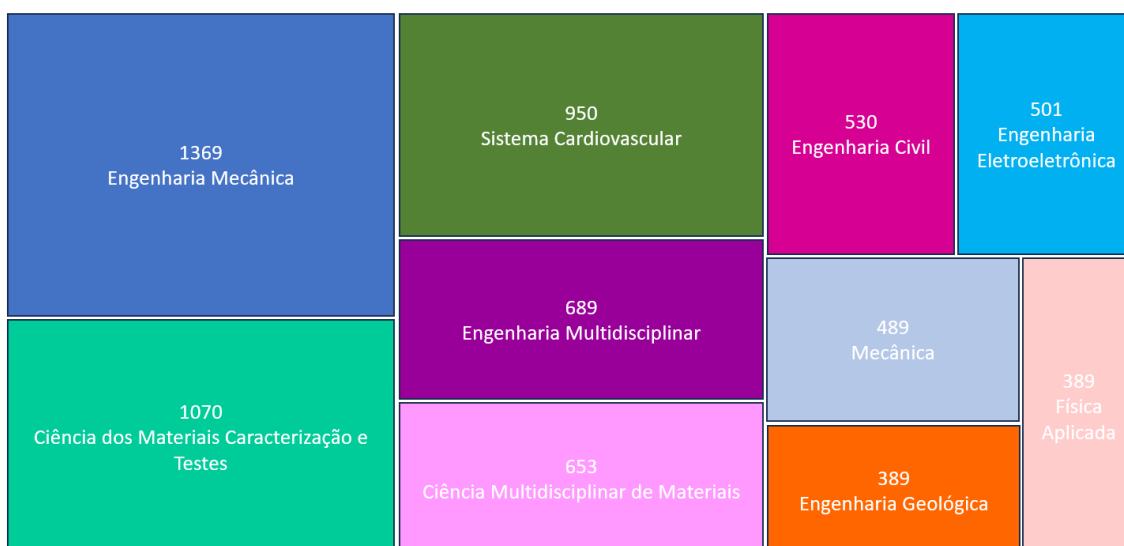
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram subdivididos entre seções: a primeira sendo relacionada a seleção de artigos, a segunda parte com relação a quantificação dos artigos, a terceira com relação a grupos de classificação para critérios de análises de falha por fim a proposta da árvore de critérios com os critérios abordados e as relações entre indicadores de performance e critérios sugeridos pela literatura.

3.1. SELEÇÃO DE ARTIGOS:

As palavras chaves utilizadas na pesquisa foram Análise de Falha, sendo utilizadas as variações de plural ou singular. Desta maneira, foram levantados 26.110 (Vinte e seis mil cento e dez) artigos na primeira busca. A partir daí foi selecionado o período a partir da indústria 4.0 tornando o quantitativo de artigos de 16.080 (Dezesseis mil e oitenta) artigos. O outro filtro foi o de artigos tornando um total de 9.218 (Nove mil duzentos e dezoito) artigos. Já com o filtro de Engenharia Mecânica a quantidade afinou para 1.361 (Mil trezentos e sessenta e um) artigos, conforme Figura 2.

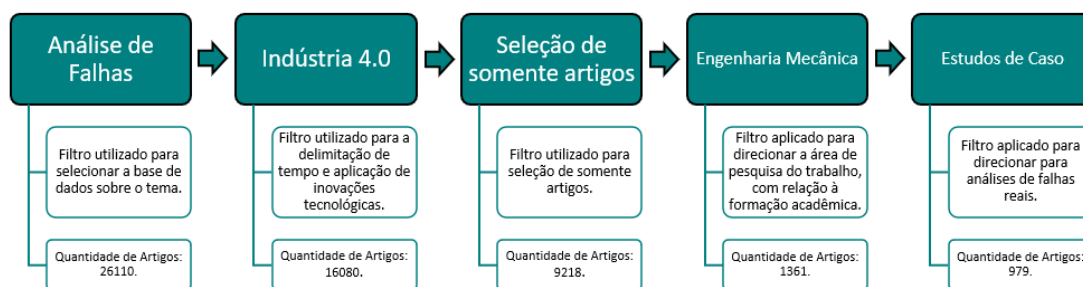
Figura 2 - Quantitativo de artigos por setor definido do Web of science.



Fonte: O Autor (2023)

Percebe-se que, mesmo com o maior número de artigos classificados como engenharia mecânica, muitos deles não recebem uma pré-classificação, o que pode comprometer a integridade da base de dados. Com o intuito de purificar a base de dados, foram selecionados apenas os artigos relacionados à análise de falha no campo do título da publicação. Isso resultou em uma redução para 979 (novecentos e setenta e nove) artigos, conforme Figura 3.

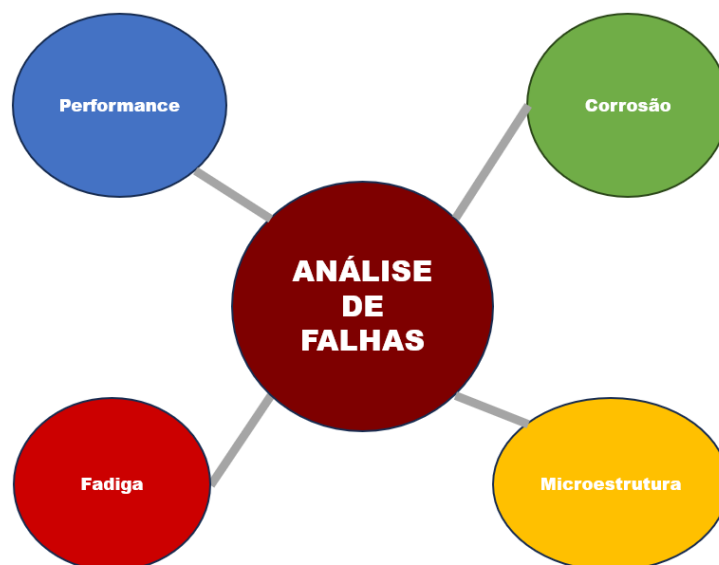
Figura 3 - Filtros para Seleção de Artigos



Fonte: O Autor (2023)

Assim, foi realizado o download dos arquivos da base de dados e anexá-dos ao software VOSviewer. A análise inicial concentrou-se na quantidade de artigos por palavra-chave utilizada, revelando quatro principais agrupamentos de temas. A palavra-chave dominante identificada foi "Failure Analysis". A Figura 4 foi apresentada como um resumo dos principais temas identificados no software, enquanto a visualização completa dos dados está disponível no Apêndice A.

Figura 4 - Análise de palavras chave dentre os artigos.



Fonte: Autor (2023)

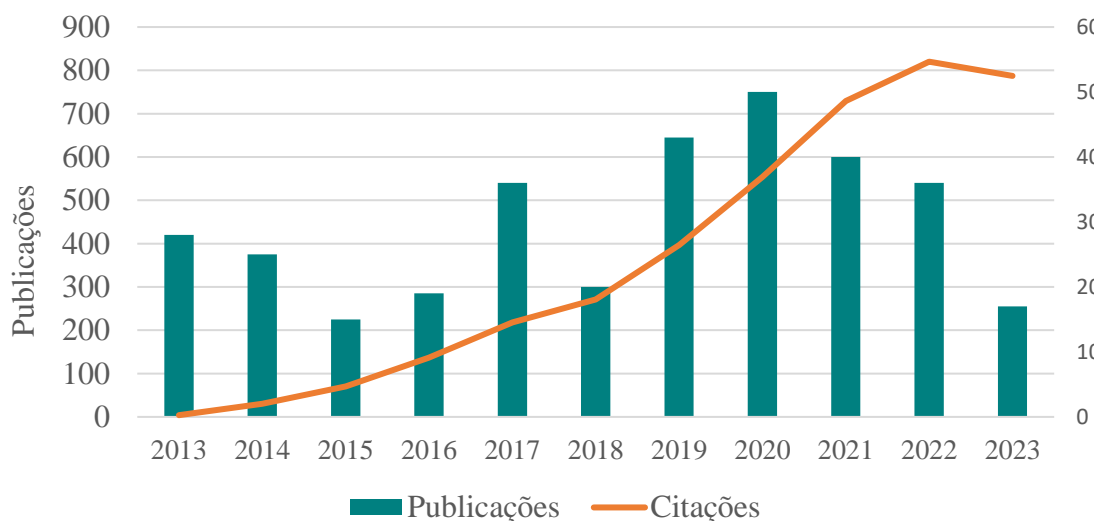
A interpretação proporcionada pelo mapa de calor do VOSviewer revela que os principais modos de falha podem ser conceituados da seguinte forma: o grupo azul está associado ao modelo e desempenho, o grupo vermelho está relacionado à fadiga, o grupo verde está vinculado à corrosão, e o grupo amarelo aborda a microestrutura dos materiais. Essas categorias destacam as principais áreas de foco quando se trata artigos relacionados a análise de falhas, fornecendo uma visão abrangente dos temas predominantes.

3.2. ABORDAGEM QUANTITATIVA DE ARTIGOS

Com relação a quantidade de artigos publicados sobre o tema no decorrer dos anos, pode-se verificar na Figura 4 um crescimento até o ano de 2020 e uma queda dos anos subsequentes, relacionados diretamente com a pandemia mundial do Covid-19. Já

as publicações no ano de 2023 não são relacionadas a quantidade total do ano, devido a extração da base ser realizada em julho de 2023.

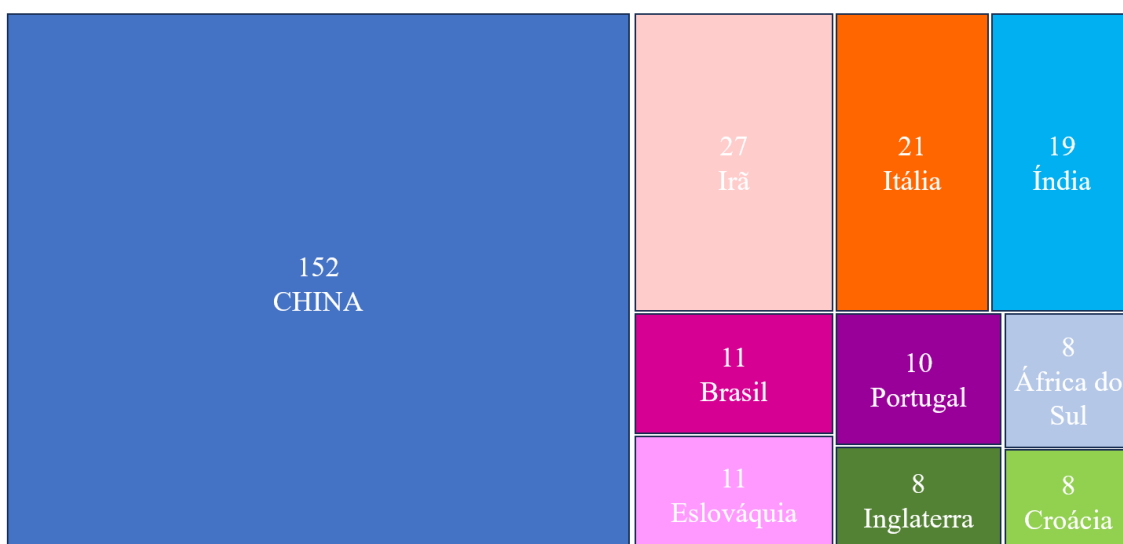
Figura 5 - Quantidade de publicações e citações por ano.



Fonte: O Autor (2023)

Outro ponto relevante para as análises é a questão geográfica das publicações de artigos no Web of Science, de acordo com a imagem extraída da base de dados, o país com maior nível de estudos a respeito de análises de falha é a China com 46% das publicações abordadas na pesquisa, o que reflete na potência mundial que a china está se tornando e a influência deste país no cenário mundial. Já com relação aos outros países o Brasil ocupa a quinta posição de artigos neste trabalho com onze artigos publicados, como apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Quantitativo de países com mais publicações sobre o tema.



Fonte: O Autor (2023)

Quanto aos autores que mais contribuíram para a lista de artigos, realizou-se uma análise dos principais temas de pesquisa abordados por eles conforme Tabela 2. Os dados analisados revelam uma visão abrangente das contribuições de diversos autores na pesquisa de falhas. Yang, ZG. e Gong, Y. emergem como os autores com mais publicações, destacando-se pelo foco em questões relacionadas a materiais e falhas devido à corrosão, especialmente em contextos como usinas de energia e tubulações. Fedorko, G. destaca-se por suas pesquisas em análises de materiais por simulação, além de seu envolvimento em estudos sobre correias transportadoras. Liu, Y. concentra-se nas falhas estruturais, explorando cenários que variam de estruturas de construções a motores. Por sua vez, Martins, RF. contribui significativamente para a compreensão das falhas provenientes de processos de produção, com especial atenção às imperfeições em materiais. Essa diversidade de temas reflete a complexidade e a amplitude das investigações no campo, proporcionando uma panorâmica rica e complementar sobre as pesquisas desenvolvidas. Diante desse cenário diversificado, surge a relevância de explorar também os critérios que desencadeiam análises de falha.

Tabela 2 - Autores com maior quantidade de publicações.

Autores	Nº de Documentos	Citações	Tema de estudo
YANG, ZG	23	297	Este autor está presente em artigos como foco em matérias e de falhas por corrosão em usinas de energia e tubulações.
GONG, Y	12	129	Este autor está presente em artigos como foco em matérias e de falhas por corrosão em usinas de energia e tubulações
FEDORKO, G	7	64	O autor tem como linha de pesquisa análises de materiais por simulação e também está presente em artigos de correias transportadoras.
LIU, Y	7	57	O autor tem como linha de pesquisa falhas estruturais, sendo elas em estruturas de construções e até mesmo de motores.
MARTINS, RF	7	45	O autor tem como área de estudo as falhas provenientes de produção com imperfeições em materiais.

Fonte: O Autor (2023)

A análise detalhada dos dados revela posições valiosas sobre a contribuição dos autores em relação ao número de citações, evidencia a relevância de suas pesquisas. Yang, ZG, destaca-se não apenas pela quantidade significativa de documentos, mas também pelas 297 citações, indicando uma influência substancial em estudos relacionados a materiais e falhas causadas por corrosão, especialmente em usinas de energia e tubulações. Milani, G, com 5 documentos e 271 citações, sobressai-se em pesquisas focadas na análise de falhas em alvenaria de estruturas, empregando testes e simulações como principais abordagens. Valente, M, com 3 documentos e 225 citações, também se destaca na análise de falhas em alvenaria estrutural. Liu, H, com 5 documentos e 135 citações, concentra-se em pesquisas relacionadas a casos catastróficos, abordando eventos críticos com impacto significativo na produção. Gong, Y, embora tenha o maior número de documentos (12), é importante notar suas 129 citações, indicando uma notável contribuição em estudos sobre materiais e falhas por corrosão em usinas de energia e tubulações. Essa análise detalhada, conforme Tabela 3, relaciona a produção acadêmica

com o impacto medido por citações, proporciona uma compreensão mais abrangente da influência e relevância dos autores na área de análise de falhas.

Tabela 3 - Autores com maior quantidade de citações em artigos

Autores	Nº de Documentos	Citações	Tema de estudo
YANG, ZG	23	297	Este autor está presente em artigos como foco em matérias e de falhas por corrosão em usinas de energia e tubulações.
MILANI, G	5	271	Artigos com foco em análise de falhas em alvenaria de estruturas com a realização de testes e simulações.
VALENTE, M	3	225	Artigos com foco em análise de falhas em alvenaria de estruturas.
LIU, H	5	135	Este autor realiza pesquisas em casos catastróficos, ou seja, eventos críticos e com grande impacto de produção.
GONG, Y	12	129	Este autor está presente em artigos como foco em matérias e de falhas por corrosão em usinas de energia e tubulações

Fonte: O Autor (2023)

Por fim dois artigos foram removidos da base técnica por se tratar de duas revisões bibliográficas onde o objeto da primeira pesquisa é uma discussão entre 13 estudos em que o autor aborda o tema de mecânica da fratura, já o segundo é uma revisão sistemática em que o autor avalia a necessidade de padronização da metodologia para a condução da análise de falha, este por sinal chega a conclusão negativa em sua análise e finaliza dizendo que não é possível aplicar um padrão pois o analista deve avaliar a melhor metodologia segundo o modo de falha (ZERBST; KLINGER; CLEGG, 2015).

3.3. GRUPOS DE CLASSIFICAÇÃO

Os artigos foram categorizados em dois amplos grupos: métodos corretivos e métodos preventivos. As análises de falha, que investigam as causas raízes após o evento de falha, foram subdivididas em três grupos: catastrófica, taxa de falhas e fator de vida. Por outro lado, as análises com o objetivo de simular e prever a possível causa da falha foram agrupadas em simulação e inspeções. Essa classificação está apresentada na Tabela 3.

Tabela 4 - Classificação quantitativa de artigos por critério proposto

Método	Critério	Porcentagem
Corretiva (51%)	Catastróficas	48%
	Taxa de Falhas	28%
	Fator de Vida	24%
Preventiva (49%)	Simulação	76%
	Inspeção	24%

Fonte: O Autor (2023)

3.3.1. Agrupamento Corretivo

Na abordagem corretiva, 51% dos artigos foram dedicados a essa temática, sendo que três critérios principais para a realização da análise de falha foram destacados pelos autores. O primeiro deles remete a falhas catastróficas, Lindgren *et al.* (2016), define que são aquelas falhas em que ocorreram uma única vez, porém com grande impacto na disponibilidade física do objeto de estudo. O segundo artifício a taxa de falhas, refere-se

a um volume de falhas ocorridas em um determinado equipamento (PIETRUCHA, 2015). Por fim o método refere-se a vida útil do componente (GUERRA *et al.*, 2020), ou seja, a falha ocorre antes do esperado e determinado pelo fabricante.

3.3.1.1. Agrupamento Falhas Catastróficas

A utilização do critério de falhas catastróficas por grande parte dos autores, representando 48% das publicações, é fundamentada no impacto significativo que essas falhas causam no meio produtivo. Esse impacto pode se manifestar tanto na produção, devido ao tempo necessário para correções, quanto no aspecto financeiro (Frendo, 2013). A abordagem desses autores na análise de falhas tem como objetivo principal evitar a reincidência desses eventos (Colombo, Oldani e Trasatti, 2018). Alguns exemplos de falhas críticas mencionadas nos artigos incluem o rompimento de tubulações essenciais, incidentes na aviação, problemas em usinas de energia e falhas em sistemas mecânicos. Essa ênfase nas falhas catastróficas reflete a preocupação em mitigar impactos severos no desempenho e na estabilidade dos sistemas, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência operacional.

Com relação ao rompimento de tubulações esta falha é catastrófica pois afeta o meio ambiente (VASSEGHI; *et al.*, 2021), ou até mesmo explosões de tubulações (WANG *et al.*, 2013) dentre os autores o modo de falha mais presente é o de corrosão, e a metodologia mais aplicada é a análise metalográfica e microscópica (LIU *et al.*, 2018), pois com elas são possíveis distinguir a macro morfologia da fratura. Para finalizar as análises, os autores Hosseini, Khadem e Yareiee. (2019), utilizaram o método dos elementos finitos para simular a tubulação e analisar a situação antes da falha.

Por outro lado, o foco dos autores que avaliam falhas nas usinas de geração de energia é de quantidade de tempo em parada, uma vez que nestes casos há a necessidade de produção contínua da planta (COLOMBO; OLDANI; TRASATTI, 2018). Para as análises de falha de usinas, a metodologia mais aplicada é a de metalografia, uma vez que os modos de falha por corrosão voltam a serem estudados, porém também se aplica a metodologia de elementos finitos, como forma de simular o sistema e encontrar parâmetros técnicos de posicionamento e utilização (URQUIZA *et al.*, 2014).

As falhas na aviação são chamadas de críticas, uma vez que, as falhas estão diretamente ligadas a segurança dos tripulantes. Os artigos relacionados falam a respeito de uma falha no cabeçote do motor (KRSTIC *et al.*, 2013) e outra com relação ao trem de pouso (FREITAS; INFANTE; BAPTISTA, 2019), ambas as falhas foram ocorridas durante o voo e foram estudadas com o objetivo de eliminar a causa raiz, nestes casos em específico, como a falha ocorreu na peça, foram analisados através do método dos elementos finitos e análise do material aplicado.

Por fim, as falhas catastróficas em sistemas mecânicos referem-se a situações em que um componente é submetido a uma força ou pressão para a qual não foi projetado, exemplificado pela falha do eixo agitador de um grande recipiente causada pela fadiga por flexão. Esta falha adquire caráter catastrófico devido ao impacto resultante na qualidade do produto e no cronograma de produção (Zangeneh; Ketabchi; Kalaki, 2014). Além disso, nos sistemas mecânicos, emprega-se o método dos elementos finitos, que tem a função de simular as condições de uso e fornece diretrizes aplicáveis (Pastorcic; Vukelic; Bozic, 2019).

Em contrapartida, as falhas mecânicas têm a capacidade de manifestar sintomas, ou seja, sinais indicativos de que uma falha catastrófica pode estar se aproximando. Nesse contexto, é incumbência do analista reunir esses dados e adotar medidas preventivas para

mitigar a iminência de uma falha grave. Um exemplo ilustrativo é a baixa pressão no sistema de lubrificação, que pode servir como um sintoma premonitório de uma possível redução no desempenho do virabrequim de um motor (Gomes et al., 2018).

3.3.1.2. Agrupamento Taxa de Falhas

Considerando os sintomas e a taxa de falhas como ponto de partida, 27% dos pesquisadores adotam esse motivo como princípio para a análise de falhas. Essa abordagem se justifica pela recorrência dos modos de falha nos componentes, indicando que as falhas ou sintomas se repetem até alcançar um número específico de intervenções corretivas. Tal método possibilita a intervenção antecipada do analista para evitar a ocorrência da falha, resultando em economias nos custos de correção e na prevenção de perdas na produção (Moshayedi, Moattari e Azizpour, 2019).

Nesse contexto de análises baseadas na taxa de falhas, os autores empregam o conceito de confiabilidade, destacando o indicador de desempenho MTBF (Tempo Médio Entre Falhas), que reflete o intervalo médio de tempo entre as falhas do ativo (Farhadi, Abapour e Sabahi, 2017).

As tubulações também são abordadas nesse critério, considerando a recorrência de furos em curvas ou corrosões frequentes em usinas de geração de energia. Essas falhas são examinadas por meio de metalografia dos tubos ou simulações computacionais de dinâmica de fluidos (Yan et al., 2021; Chen, Yao e Yang, 2014).

Uma abordagem quantitativa relacionada à aviação foi apresentada por Rashid et al. (2015), que destacou o aumento na quantidade de falhas no sistema de transmissão de helicópteros. Utilizando a árvore de falhas, uma metodologia que permite explorar diferentes hipóteses para identificar a causa raiz, a análise revelou uma baixa confiabilidade no sistema de lubrificação.

Por fim, Murugan, Raji e Ramasamy, Raju (2019) aplicam a metodologia de análise de causa raiz em falhas recorrentes de transformadores. Analisando 196 casos de maneira estatística com base em tensão, localização e componentes, concluíram que a causa raiz das falhas estava relacionada a erros na estratégia de manutenções preventivas (Murugan e Ramasamy, 2015).

3.3.1.3. Agrupamento por Fator de vida

Quanto aos artigos que se relacionam com o fator de vida dos componentes, a representação é de 23% do total. Essa abordagem tem sua justificativa quando a falha ocorre antes do tempo de vida predeterminado do componente. Essa estratégia é especialmente aplicada em componentes sujeitos a movimento, como transmissões, bombas e turbinas, como destacado por Soffritt et al. (2013). Adicionalmente, observa-se a aplicação desse conceito em tubulações, especialmente quando ocorrem falhas prematuras, conforme apontado por Kumari, Satyanarayana e Srinivas (2014).

Um exemplo prático é a transmissão de força, crucial para reduzir a rotação do motor e aumentar o torque no sistema de locomoção. A falha deste componente pode resultar na parada de um trem, causando prejuízos financeiros significativos devido à perda de entregas oportunas. Em um estudo recente, Gong et al. (2021) conduziram uma análise de falha motivada pela ocorrência prematura de falha em um componente projetado para uma vida útil de 5 anos, mas que falhou após apenas dois anos de uso.

As turbinas, presentes em usinas ou veículos, desempenham um papel fundamental na confiabilidade e vida útil do motor. A análise de falha em turbinas é iniciada quando ocorre uma falha prematura, sendo este o caso mencionado por Kumari, Satyanarayana e Srinivas (2014). Nesse contexto, a prevenção de falhas precoces torna-se crucial para garantir o desempenho e a eficiência operacional desses sistemas.

3.3.2. Agrupamento Preventivo

Os artigos de abordagem preventiva, são assim classificados pois a falha ainda não ocorreu e os autores atuam para que não ocorra (ZHOU *et al.*, 2014). Dois métodos se destacam dentre estes artigos, são eles o método dos elementos finitos, que através de simulação computacional permite o analista prever as falhas, e o método de inspeção, que utiliza os inspetores para cercar as possíveis falhas e acompanhar os desgastes dos equipamentos.

3.3.2.1. Agrupamento Simulação por Ensaio

O método dos elementos finitos está presente em 46% dos artigos de prevenção neste momento os autores estão com objetivo de prever os modos de falha e através da simulação computacional desenvolver análises de espectro de resposta. Sendo assim os softwares são utilizados para simular as tensões e esforços nos objetos em análise e assim encontrar pontos de fragilidade nos componentes mecânicos, podendo assim prever modos de falha (SHEN; LU; ZENG, 2017).

Outro modo de falha muito aplicado na simulação é a análise por fadiga, este modo é simulado pois seu resultado advém de cargas cíclicas aplicadas à peça e assim é possível predeterminar a fator de vida útil do componente em relação ao esforço mecânico aplicado ao componente (MA *et al.*, 2022).

Além dos elementos finitos outro método aplicado nas análises de falha é o de teste, estes trabalhos utilizam corpos de prova e aplicam as tensões e esforços solicitantes pela estrutura, com a finalidade de estudar a resistência máxima do material e utilizar destes valores para o projeto estrutural do produto final (SHARIATI *et al.*, 2014).

3.3.2.2. Agrupamento de Inspeções

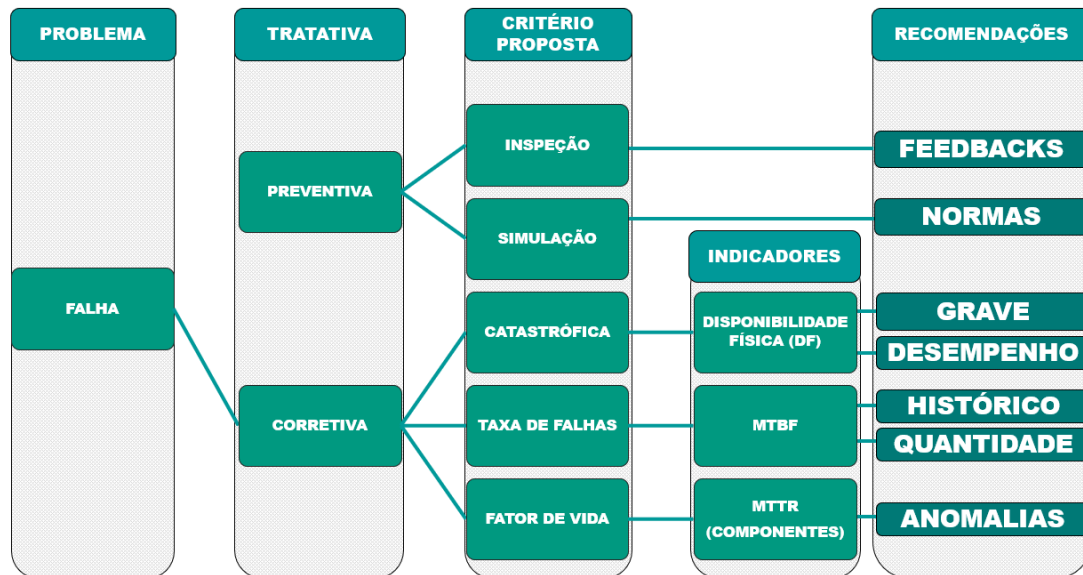
Apesar de este método ser pouco citado em artigos, a sua aplicação é imprescindível na indústria, uma vez que são estes profissionais que vão acompanhar os ativos e tratar os pontos antes que o impacto da manutenção corretiva seja real. Dentre estes profissionais, podem ser classificados em sensíveis, aqueles que vão ao ativo e realizam as inspeções visuais, auditivas, térmicas e até mesmo de vibração, e preditiva sendo aqueles profissionais que analisam os dados dos equipamentos e projetam suas devidas manutenções. Como por exemplo nas tubulações, as inspeções fornecem dados sobre a condição e orientações para futuros trabalhos de manutenção (SINGH; MARKESSET, 2014).

3.4. ÁRVORE DE CRITÉRIOS

Os artigos pesquisados foram fundamentais para descrever uma proposta de árvore de critérios, conforme Figura 6. Na base dessa árvore encontra-se o problema a ser sanado ou a falha. Esta árvore se estratifica em dois grandes galhos: manutenções corretivas e preventivas, para a representação, não é criada a ligação direta entre a falha e a preventiva pois a manutenção preventiva não parte da falha. O galho de manutenção corretiva possui três ramos, sendo eles a taxa de falhas, a catastrófica e o fator de vida,

com um ponto de atenção quando o ramo da taxa de falhas se encontra com o ramo de falhas catastróficas. Por outro lado, temos dois galhos partindo da prevenção, que são métodos para evitar as falhas, sendo eles os de elementos finitos e inspeção.

Figura 7- Proposta de Árvore de Critérios



Fonte: O Autor (2023)

Com o objetivo de assegurar uma abordagem preventiva, os princípios das análises de falha não se baseiam nos indicadores de desempenho, mas sim na manutenibilidade dos equipamentos. Dessa maneira, os analistas conseguem antecipar os modos de falha dos equipamentos, assegurando uma manutenção eficaz antes que a falha ocorra. Essa abordagem elimina a conexão retroativa entre a falha e as ações preventivas na árvore proposta.

Além disso, o critério inspeção é relacionado com o feedback do usuário ou operador, sugeridos pela literatura, por ser essencial para garantir a confiabilidade e segurança de sistemas. Inspeções sistemáticas identificam potenciais problemas, validam observações e antecipam falhas, proporcionando uma base sólida para análises. O feedback do usuário complementa essas inspeções, oferecendo perspectivas humanas valiosas, validando observações e antecipando problemas não detectados. Esse ciclo contínuo de inspeção, análise de falhas, implementação de correções e feedback do usuário forma um processo de melhoria constante, aprimorando a confiabilidade operacional e garantindo a eficácia das medidas preventivas e corretivas. Integrar essas práticas fortalece a gestão de confiabilidade, respondendo proativamente às necessidades dos usuários e mantendo sistemas em condições ótimas de funcionamento.

O critério para análises de falhas por simulações e ensaios mecânicos está intrinsicamente ligado às exigências regulatórias ou normativas. Ao estabelecer critérios alinhados com boas práticas da indústria, é possível validar a conformidade com requisitos específicos, aprimorar a segurança por meio da identificação precoce de falhas e documentar de forma abrangente os resultados. A integração dessas práticas não apenas atende às normativas, mas também contribui para avaliações de risco, adaptação a

mudanças regulatórias e, em última análise, para a confiabilidade e segurança contínuas de sistemas e produtos.

A partir da visão da árvore de análise de falhas, as falhas catastróficas, embora não sejam explicitamente descritas pelos autores, podem ser associadas ao indicador de disponibilidade física. Esse indicador representa a proporção do tempo em que o equipamento ou conjunto permanece em condição de operação, permitindo a análise do impacto de determinada falha no sistema produtivo.

A conexão com falhas catastróficas fica evidente ao considerar falhas críticas ou graves, ambas implicando impactos significativos na segurança, operação ou resultados finais. Adicionalmente, o desempenho pode servir como indicador de falhas catastróficas iminentes. Nesse cenário, a análise torna-se essencial para identificar e corrigir problemas antes que conduzam à reincidência de eventos catastróficos, garantindo a estabilidade e eficiência do sistema.

Já para o caso da taxa de falhas o indicador recomendado seria o MTBF, uma vez que este indicador tem como denominador o quantitativo de falhas de um determinado sistema. Com ele pode se observar o impacto de pequenas falhas ou de sintomas recorrentes para assim determinar as melhores tratativas antes de uma grande manutenção.

Com isso, o critério de análises de falhas por taxa de falhas e o histórico do ativo, foram relacionados pois, desempenham um papel fundamental na gestão de ativos e manutenção. Ao analisar a taxa de falhas em conjunto com o histórico do ativo, é possível identificar padrões ao longo do tempo, determinar a consistência ou mudanças na taxa de falhas e identificar períodos críticos. Essa abordagem permite o desenvolvimento de estratégias de manutenção mais eficazes, antecipando e prevenindo falhas com base em informações observadas ao longo do tempo, contribuindo para a confiabilidade e eficiência do sistema.

A análise da taxa de falhas não apenas fornece informações sobre o desempenho passado do ativo, mas também atua como um alerta antecipado para potenciais eventos catastróficos, permitindo a implementação de medidas preventivas e a manutenção proativa para garantir a segurança, a operação contínua e a eficiência do sistema.

Finalmente, o critério de fator de vida está alinhado com o indicador de performance MTTR, dado que o critério envolve a substituição de componentes e é utilizado um considerável tempo para essa manutenção. Além disso, o fator de vida possui uma conexão direta com o conceito de confiabilidade, buscando assegurar a aplicabilidade confiável do componente em uma operação específica. Este indicador desempenha um papel fundamental como uma peça crucial para garantir a operação contínua e a eficiência da máquina.

A relação entre o indicador do fator de vida e os Padrões Anormais ou Inesperados é evidente quando se considera que a detecção de padrões anormais de operação, medições fora dos limites normais ou comportamento inesperado pode indicar a necessidade de investigação para identificar e corrigir possíveis falhas. No contexto do fator de vida, a observação de variações nos padrões de desempenho ou medições além dos limites estabelecidos pode ser um sinal de que a vida útil do componente está se aproximando do fim, indicando a importância de uma análise mais aprofundada. Essa relação direta destaca a relevância do fator de vida como um indicador antecipado para identificar anomalias e tomar ações corretivas antes que ocorram falhas significativas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises de falhas desempenham um papel fundamental nas indústrias, tanto em abordagens corretivas quanto preventivas. Elas são responsáveis por definir a estratégia de manutenção adotada pela empresa e orientar as principais ações a serem implementadas para tratar as manutenções corretivas. Ao iniciar o trabalho de pesquisa, foi identificado que, apesar da abundância de artigos sobre análise de falhas, a literatura não oferece um compêndio consolidado dos motivos que justificam a realização dessas análises, fornecendo apenas sugestões dispersas. Portanto, torna-se essencial investigar os critérios empregados na indústria e consolidá-los em uma pesquisa única, com o propósito de orientar os analistas na definição de prioridades para as análises de falhas.

Nesse contexto, o objetivo principal da pesquisa foi formular uma árvore de critérios para análise de falhas. Constata-se que esse objetivo foi alcançado, pois, além de desenvolver a árvore proposta, foram realizadas comparações com indicadores de desempenho e considerações sugeridas na literatura.

O primeiro objetivo específico, que consistia na seleção de artigos para a revisão da literatura, foi alcançado. Através da escolha criteriosa dos artigos, foi possível estabelecer uma base de dados com fichamento, permitindo a diversificação da matriz de critérios e identificação de padrões entre os estudos investigados.

O segundo objetivo específico visou estabelecer relações diretas entre os critérios propostos e os indicadores de performance. A conexão entre o indicador de disponibilidade física e as falhas catastróficas é evidenciada pela medida de tempo em que o ativo não está disponível para operação. Quanto à taxa de falhas e o MTBF, essa relação permite analisar o impacto de falhas menores ou sintomas recorrentes, contribuindo para a identificação de tratamentos eficazes antes de uma manutenção significativa. Por fim, a relação entre o fator de vida e o MTTR permite entender o tempo investido em manutenções corretivas para a substituição de componentes.

A pesquisa foi fundamentada na hipótese de que os critérios para conduzir análises de falhas estão detalhados em estudos de caso que investigam as ocorrências de falhas, servindo como justificativa principal para a pesquisa. Ao longo do trabalho, foi constatado que os estudos direcionados à prevenção de falhas também incluem critérios para condução das análises. Dessa forma, a proposta final da árvore de critérios pode ser validada para todos os critérios sugeridos pela literatura.

A metodologia adotada na pesquisa teve início com uma revisão da literatura, utilizando o Web of Science como fonte de dados e aplicando filtros específicos de engenharia mecânica, juntamente com palavras-chave de pesquisa. Entretanto, é relevante mencionar que a pesquisa apresentou limitações, concentrando-se em artigos direcionados à engenharia mecânica e utilizando palavras-chave restritas, como "análise de falha". Recomenda-se que futuras investigações contemplem uma abordagem mais abrangente, incluindo outras áreas da engenharia, a fim de ampliar a diversidade de perspectivas e informações disponíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUINIS, H.; BRADLEY, K. J. Best-practice recommendations for designing and implementing experimental vignette methodology studies. *Organizational Research Methods*, v. 17, p. 351–371, 2014. DOI: 10.1177/1094428114547952.

ALCÂNTARA, L.; PEREIRA, I.; SILVA, R.; LIMA, M. Análise de confiabilidade para a redução do número de manutenções corretivas nos caminhões off-highway. In: XLII Encontro Nacional De Engenharia De Produção, Contribuição da Engenharia de Produção para a Transformação Digital da Indústria Brasileira, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, Outubro de 2022.

ALMEIDA, T; REIS, E; PASCARELLI, L; BONGIOVANNI, R; TEODORO, R. Artroplastia De Interposicao Em Cotovelo: Revisao Sistematica, Vol. 29 Ed. 4. Pag 219 a 222. DOI: 10.1590/1413-785220212904238960.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS-ABNT. NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

BOOKER, N. K.; CLEGG, R. E.; KNIGHTS, P.; GATES, J. D. The need for an internationally recognised standard for engineering failure analysis. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Australia. Mar. 2020. Vol. 110. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104357.

CARVALHO, G. D. G.; RESENDE, L. M. M.; PONTES, J.; DE CARVALHO, H. G.; BETIM, L. M. Innovation and Management in MSMEs: A Literature Review of Highly Cited Papers. *Sage Open*, Vol. 11, 2021, DOI:10.1177/21582440211052555.

CHEN, F. J.; YAO, C.; YANG, Z. G. Failure analysis on abnormal wall thinning of heat-transfer titanium tubes of condensers in nuclear power plant Part II: Erosion and cavitation corrosion. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. China. Fev. 2014. Vol. 37. DOI:10.1016/j.engfailanal.2013.11.002.

CHUNG, I-HUA. Exploring the Influence of the Parameters' Relationship between Reliability and Maintainability for Offshore Wind Farm Engineering, *Energies*, Taiwan, Agosto, 2022. DOI: 10.3390/en15155610.

COLOMBO, A.; OLDANI, L.; TRASATTI, S. P. Corrosion failure analysis of galvanized steel pipes in a closed water cooling system. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Italia. Fev. 2018. Vol. 84. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.10.008.

CORDEIRO, J. C.; ASSUMPÇÃO, M. R. Indicadores para gestão na manutenção corretiva. *Exacta*, vol. 14, núm. 2, 2016, pp. 173-182, São Paulo, Brasil. DOI: 10.5585/ExactaEP.v14n2.5895.

FARHADI, M.; ABAPOUR, M.; SABAHI, M. Failure analysis and reliability evaluation of modulation techniques for neutral point clamped inverters - A usage model approach. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Iran. Jan. 2017. Vol. 71. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.06.010.

FREITAS, M.; INFANTE, V.; BAPTISTA, R. Failure analysis of the nose landing gear axle of an aircraft. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Portugal. JUL. 2019. Vol. 101. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.03.010.

FRENDO, F. Analysis of the catastrophic failure of a dockside crane jib. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Italia. Jul. 2013. Vol. 31. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.02.026.

GOMES, J.; GAIVOTA, N.; MARTINS, R. F.; SILVA, P. P. Failure analysis of crankshafts used in maritime V12 diesel engines. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Portugal. Out. 2018. Vol. 92. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.06.020.

GONG, Y.; YANG, Z. G.; MENG, X. H. Failure analysis of one peculiar 'Yin-Yang' corrosion morphology on heat exchanger tubes in purified terephthalic acid (PTA) dryer. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. China. Jul. 2013. Vol. 31. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.01.038.

GUERRA-FUENTES, L.; TORRES-LÓPEZ, M.; HERNANDEZ-RODRIGUEZ, M. A. L.; GARCIA-SANCHEZ, E. Failure analysis of steel wire rope used in overhead crane system. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Mexico. Dez. 2020. Vol. 118. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104893.

HOSSEINI, R. K.; YAREIEE, S. Failure analysis of boiler tube at a petrochemical plant. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Iran. Dez. 2019. Vol. 106. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104146.

IVORRA, S.; TORRES, B.; CÁRCEL, A. C. Analysis of the failure and remedial measures taken after the collapse of a historical bell. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Spain. Mar. 2022. Vol. 133. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105950.

JIS Q 8901; Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules—Requirement for Reliability Assurance System (Design, Production and Product Warranty). Japanese Standards Association: Tokyo, Japão, Janeiro 2012.

KRSTIC, B.; RASUO, B.; TRIFKOVIC, D.; RADISAVLJEVIC, I.; RAJIC, Z.; DINULOVIC, M. Failure analysis of an aircraft engine cylinder head. *Engineering Failure Analysis*, Pergamon-Elsevier Science Ltd., Serbia, Setembro de 2013, vol. 32. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.03.004.

KUMARI, S.; SATYANARAYANA, D. V. V.; SRINIVAS, M. Failure analysis of gas turbine rotor blades. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Índia. Out. 2014. Vol. 45. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.06.003.

LINDGREN, M.; BERGMAN, G.; KAKKONEN, M.; LEHTONEN, M.; JOKINEN, J.; WALLIN, M.; SAARELA, O.; VUORINEN, J. Failure analysis of a leaching reactor made of glass-fiber reinforced plastic. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Finlandia. Fev. 2016. Vol. 60. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.026.

LIU, W. Y.; SHI, T. H.; LU, Q.; ZHANG, Z.; MING, C. Z.; GONG, J. W.; REN, J. Failure analysis on fracture of S13Cr-110 tubing. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-

Elsevier Science Ltd. China. Ago. 2018. Vol. 90. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.03.004.

MA, D. K.; SHI, J.; YAN, Z. Q.; SUN, L. L. Failure analysis of fatigue damage for fastening clips in the ballastless track of high-speed railway considering random track irregularities. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. China. Jan. 2022. Vol. 131. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105897.

MADAVAN, R.; BALARAMAN, S. Failure analysis of transformer liquid - solid insulation system under selective environmental conditions using Weibull statistics method. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. India. JUL. 2016. Vol. 65. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.03.017.

MAJSTOROVIC, V. D.; MITROVIC, R. *Industry 4.0 Programs Worldwide*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Pag. 78 a 99, maio, 2019, DOI: 10.1007/978-3-030-18180.

MOSHAYEDI, H.; MOATTARI, M.; AZIZPOUR, K. Failure analysis of outer casing bolts of a 325 MW steam turbine. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Iran. Mar. 2019. Vol. 97. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.044.

MURUGAN, R.; RAMASAMY, R. Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. India. Set. 2015. Vol. 55. DOI:10.1016/j.engfailanal.2015.06.002.

OU, G. F.; WANG, K. X.; ZHAN, J. L.; TANG, M.; LIU, H. H.; JIN, H. Z. Failure analysis of a reactor effluent air cooler. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. China. Jul. 2013. Vol. 31. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.02.025.

PASTORCIC, D.; VUKELIC, G.; BOZIC, Z. Coil spring failure and fatigue analysis. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Croatia. Mai. 2019. Vol. 99. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.017.

PEREIRA, I.; GOMES, C. Dos Primórdios Da Revolução Industrial A Indústria 4.0, *Recima21 - Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 3, n.11, 2022.

PIETRUCHA, K. Failure analysis and assessment on the exemplary water supply network. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Polonia. Nov. 2015. Vol. 57. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.07.036.

RAFAEL, D. *Análise E Monitoramento De Falhas Em Sistemas Mecânicos Uma Revisão Sistemática*, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2022.

RASHID, H. S. J.; PLACE, C. S.; MBA, D.; LIM, R.; HEALEY, A.; KLEINE-BEEK, W.; ROMANO, M. Helicopter MGB oil system failure analysis using influence diagrams and random failure probabilities. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Inglaterra. Abr. 2015. Vol. 50. DOI:10.1016/j.engfailanal.2014.12.013.

SAUNDERS, M.; LEWIS, P.; THORNHILL, A. *Research methods for business students*. Pearson education, Ed. 5, 2009. ISBN: 978-0-273-71686-0.

SHARIATI, M.; SHARIATI, A.; SULONG, N. H. R.; SUHATRIL, M.; KHANOUKI, M. Fatigue energy dissipation and failure analysis of angle shear connectors embedded in

high-strength concrete (Retracted article. See vol. 151, 2023). *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Malaysia. Jun. 2014. Vol. 41. DOI:10.1016/j.engfailanal.2014.02.017.

SHEN, X. L.; LU, L. T.; ZENG, D. F. Fatigue failure analysis of high-strength bolts used for high-speed railway vehicle braking discs. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. China. Set. 2020. Vol. 115. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104661.

SHI, C. S.; ZHU, X. H.; CHEN, Y. K.; TANG, L. P. Failure analysis of general stator and uniform wall thickness stator. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. China. Dez. 2018. Vol. 94. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.07.018.

SINGH, M.; MARKESET, T. Hybrid models for handling variability and uncertainty in probabilistic and possibilistic failure analysis of corroded pipes. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Norway. Jul. 2014. Vol. 42. DOI:10.1016/j.engfailanal.2014.04.008.

SOFFRITTI, C.; MERLIN, M.; VAZQUEZ, R.; FORTINI, A.; GARAGNANI, G. L. Failure analysis of worn valve train components of a four-cylinder diesel engine. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Itália. Out. 2018. Vol. 92. DOI:10.1016/j.engfailanal.2018.06.022.

SU, C.; PAN, A. X.; GONG, Y.; YANG, Z. G. Failure analysis on rubber universal spherical joints for rail vehicles. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. China. Ago. 2021. Vol. 126. DOI:10.1016/j.engfailanal.2021.105453.

URQUIZA, G.; GARCÍA, J. C.; GONZÁLEZ, J. G.; CASTRO, L.; RODRÍGUEZ, J. A.; BASURTO-PENSADO, M. A.; MENDOZA, O. F. Failure analysis of a hydraulic Kaplan turbine shaft. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Mexico. Jun. 2014. Vol. 41. DOI:10.1016/j.engfailanal.2014.02.009.

VASSEGHI, A.; HAGHSHENAS, E.; SOROUSHIAN, A.; RAKHSHANDEH, M. Failure analysis of a natural gas pipeline subjected to landslide. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Iran. Jan. 2021. Vol. 119. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.105009.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer. *Scientometrics*, v. 111, p. 1053–1070, 2017. DOI: 10.1007/s11192-017-2300-7.

YAN, Z. X.; WANG, L. D.; ZHANG, P. J.; SUN, W.; YANG, Z. Q.; LIU, B. Y.; TIAN, J. S.; SHU, X. Q.; HE, Y. P.; LIU, G. C. Failure analysis of Erosion-Corrosion of the bend pipe at sewage stripping units. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. China. Nov. 2021. Vol. 129. DOI:10.1016/j.engfailanal.2021.105675.

ZANGENEH, S.; KETABCHI, M.; KALAKI, A. Fracture failure analysis of AISI 304L stainless steel shaft. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Iran. Jan. 2014. Vol. 36. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.09.013.

ZERBST, U.; KLINGER, C.; CLEGG, R. Fracture mechanics as a tool in failure analysis - Prospects and limitations. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. Alemanha. Set. 2015. Vol. 55. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.07.001.

ZHONG, R., et al.: Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering* 3, 616–630 (2017). DOI: 10.1016/J.ENG.2017.05.015.

ZHOU, Y.; HUANG, Z. Q.; TAN, L.; MA, Y. C.; QIU, C. S.; ZHANG, F. X.; YUAN, Y.; SUN, C. M.; GUO, L. Cone bit bearing seal failure analysis based on the finite element analysis. *Engineering Failure Analysis*. Pergamon-Elsevier Science Ltd. China. Out. 2014. Vol. 45. DOI:10.1016/j.engfailanal.2014.07.007.

