

GABRIEL SOUZA LOPES
LUÍS ANDRÉ HENRIQUE PEREIRA

**ESTUDO DE CASO: DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA EM
POWER APPS PARA EQUIPES AUTÔNOMAS EM INDÚSTRIA DE
GRANDE PORTE - APLICAÇÃO NA CONFIABILIDADE E
AUTONOMIA DOS PROCESSOS DE MANUTENÇÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2023

GABRIEL SOUZA LOPES
LUÍS ANDRÉ HENRIQUE PEREIRA

**ESTUDO DE CASO: DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA EM
POWER APPS PARA EQUIPES AUTÔNOMAS EM INDÚSTRIA DE
GRANDE PORTE - APLICAÇÃO NA CONFIABILIDADE E
AUTONOMIA DOS PROCESSOS DE MANUTENÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Luciano José Arantes

Uberlândia
2023

GABRIEL SOUZA LOPES
LUÍS ANDRÉ HENRIQUE PEREIRA

**ESTUDO DE CASO: DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA EM
POWER APPS PARA EQUIPES AUTÔNOMAS EM INDÚSTRIA DE
GRANDE PORTE - APLICAÇÃO NA CONFIABILIDADE E
AUTONOMIA DOS PROCESSOS DE MANUTENÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciano José Arantes

Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Eng.Aer. Lohanna Ferreira Paiva

Uberlândia, 17 de Novembro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Prezados Senhores,

Gostaríamos de expressar nossa gratidão a todos que nos apoiaram e contribuíram para a realização desta monografia. Agradecemos imensamente por todo o suporte, conhecimento e incentivo que recebemos ao longo dessa jornada.

Primeiramente, queríamos agradecer ao nosso orientador, Luciano Arantes, pela paciência, sabedoria e dedicação durante todo o processo. Sua orientação foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Aos colegas de curso de Engenharia Mecânica, agradecemos pela amizade e cooperação durante toda a graduação. Juntos, enfrentamos desafios e compartilhamos aprendizados, tornando essa etapa da nossa vida mais rica e gratificante.

Aos nossos companheiros de trabalho na indústria, somos gratos pelas oportunidades de aprendizado prático e pela troca de experiências. Essa convivência nos ajudou a expandir nossos horizontes e enriquecer nosso trabalho.

Agradecemos também aos professores e demais profissionais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia que contribuíram de alguma forma para o nosso desenvolvimento intelectual. Seus ensinamentos e experiências foram essenciais para a construção deste projeto.

Aos amigos e familiares, agradecemos pelo apoio e compreensão durante os momentos de estresse e ansiedade. Vocês foram fundamentais para que nós mantivéssemos o foco e a determinação na busca dos nossos objetivos.

Por fim, quero agradecer a todos os autores e especialistas que serviram de inspiração e base teórica para este estudo. A contribuição deles foi crucial para entender o contexto da confiabilidade de manutenção e engenharia dentro da indústria, proporcionando uma base sólida para a realização deste trabalho.

Com gratidão,

Gabriel Souza Lopes e Luís André Henrique Pereira

LOPES, G. S.; PEREIRA, L. P. **Estudo de caso: desenvolvimento de ferramenta em Power Apps para equipes autônomas em indústria de grande porte - aplicação na confiabilidade e autonomia dos processos de manutenção.** 2023. 61 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

RESUMO

A presente monografia tem como objetivo correlacionar, por meio de um estudo de caso em uma multinacional do ramo alimentício, os conceitos de manutenção autônoma, fundamentados na metodologia TPM (*Total Productive Maintenance*), aplicados à Indústria 4.0, com a utilização de ferramentas digitais em ambiente fabril e a garantia da confiabilidade dos processos de manutenção, com enfoque na MCC (Manutenção Centrada em Confiabilidade) e sua relação com o TMC (*Total Manufacturing Cost*). Para alcançar este objetivo, foi empregada uma metodologia que inclui análise bibliográfica e desenvolvimento de uma ferramenta no *Power Apps*®. A pesquisa bibliográfica reuniu informações sobre o estado atual da indústria no Brasil e a evolução global dessa área. Foi explorado também o papel da manutenção autônoma dentro do TPM e como a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) contribui para a cultura de "zero perdas", resultando em melhorias globais. A MCC, através de sua estratégia sistemática de identificar e priorizar falhas potenciais, complementa a manutenção autônoma do TPM, permitindo uma administração mais efetiva dos recursos destinados à manutenção. O desenvolvimento da ferramenta no *Power Apps*® permitiu a construção de relatórios no *Power BI*®, garantindo informações relevantes para a confiabilidade da manutenção e a geração de contramedidas na empresa analisada. A partir dos resultados, foi possível relacionar como as novas tecnologias e ferramentas digitais podem ser aliadas ao processo de eliminação de falhas no ambiente fabril, considerando a aplicação de conceitos de MCC, manutenção autônoma baseada em TPM e sua relação com a redução do TMC. Os principais resultados deste estudo incluem a consolidação de uma base de dados consistente que favorece a contínua melhoria das análises de falhas, incluindo a utilização da MCC para priorizar e tratar essas falhas. O estudo também gerou recomendações para o desenvolvimento de ferramentas de análise baseadas nos critérios de falha contidos no banco de dados do *Power Apps*®. Além disso, a pesquisa proporcionou a capacidade de calcular a confiabilidade ao nível de componentes individuais do equipamento analisado. O trabalho demonstrou como a aplicação destes conceitos pode impactar positivamente na redução do TMC.

Palavras-chave: Manutenção; Confiabilidade; Indústria Alimentícia; Produtividade; Melhoria de desempenho.

LOPES, G. S.; PEREIRA, L. P. **Case study: development of a Power Apps tool for autonomous teams in large industries - application to the reliability and autonomy of maintenance processes.** 2023. 61 pages. Final Paper (Graduation in Mechanical Engineering) – Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2023.

ABSTRACT

The present monograph aims to correlate, through a case study in an food multinational company, the concepts of autonomous maintenance, founded on the TPM (Total Productive Maintenance) methodology, applied to Industry 4.0, with the use of digital tools in a manufacturing environment and the assurance of the reliability of maintenance processes, focusing on RCM (Reliability-Centered Maintenance) and its relationship with TMC (Total Manufacturing Cost). To achieve this goal, a methodology that includes a literature review and the development of a tool in *Power Apps*©, was employed. The literature review gathered information about the current state of the industry in Brazil and the global evolution of this area. The role of autonomous maintenance within TPM and how Reliability-Centered Maintenance contributes to the culture of "zero losses," resulting in global improvements, was also explored. RCM, through its systematic strategy of identifying and prioritizing potential failures, complements TPM's autonomous maintenance, allowing a more effective management of resources allocated to maintenance. The development of the tool in *Power Apps*© allowed for the input of data into the *SAP*© system, ensuring relevant information for maintenance reliability and the generation of countermeasures in the company analyzed. From the results, it was possible to relate how new technologies and digital tools can be allied to the process of eliminating failures in the manufacturing environment, considering the application of RCM concepts, TPM-based autonomous maintenance, and its relationship with the reduction of TMC. The main results of this study include the consolidation of a consistent database that favors the continuous improvement of failure analyses, including the use of RCM to prioritize and address these failures. The study also generated recommendations for the development of analysis tools based on the failure criteria contained in the *Power Apps*© database. Additionally, the research provided the ability to calculate reliability at the level of individual components of the equipment analyzed. The work demonstrated how the application of these concepts can positively impact the reduction of TMC.

Keywords: Maintenance; Reliability; Food Industry; Productivity; Performance Improvement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Revoluções industriais (SENAI, 2019).....	17
Figura 2. Curva de banheira (Selitto, 2005).....	35
Figura 3. Exemplo de ficha de falha.	38
Figura 4.1 Fluxograma de trabalho inicial.....	40
Figura 4.2 Fluxograma de trabalho.....	40
Figura 5. Conjunto Mecânico Rolagem e Perfuração.....	41
Figura 6. Vista Explodida Conjunto Mecânico Rolagem e Perfuração.	43
Figura 7. Tela de apresentação da confiabilidade inicial.	44
Figura 8. Exemplos de falhas em correias.	45
Figura 9. Exemplo do FMEA.....	46
Figura 10. Exemplos de falhas em polias sincronizadoras.....	46
Figura 11. Relação entre número de quebra e tempo indisponível de máquina por cada trimestre.	50
Figura 12. Tela de apresentação da confiabilidade final.	52
Figura 13. Tendência de quebras de correias.	55
Figura 14. Tendência de quebras de rolamentos.	55
Figura 15. Tendência de quebras e sensores.	56
Figura 16. <i>Dashboard</i> de falhas.	58
Figura 17. <i>Breakdowns vs. Cause Classifications</i> ao longo dos meses.....	58
Figura 18. <i>Breakdowns vs. Recurrence</i> ao longo dos meses.....	59
Figura 19. <i>Dashboard</i> de confiabilidade (%).	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACR	Análise de Causa Raiz
AM	Manutenção Autônoma
DT	Downtime
EGE	Eficiência Geral dos Equipamentos
FMEA	Análise dos Modos e Efeitos de Falha
FTA	Análise de Árvore de Falhas
IA	Inteligência Artificial
IoT	Internet das Coisas
KPIs	Indicadores-chave de desempenho
MASP	Método de Análise e Solução de Problemas
MMC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
MTBF	Mean Time Between Failures
OEE	Eficiência Global do Equipamento
PDCA	Plan-Do-Check-Act
P&D	pesquisa e desenvolvimento
RCM	Manutenção Centrada na Confiabilidade
RPN	Risk Priority Number
TMC	Custo Total de Fabricação
TPM	Manutenção Produtiva Total
TPS	Sistema de Produção Toyota

LISTA DE SÍMBOLOS

© *Copyright*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.2 OBJETIVOS GERAIS	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1. REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	16
2.2. MOMENTO ATUAL INDUSTRIAL BRASILEIRO	17
2.3. INDUSTRIA 4.0 E SEUS DESAFIOS.....	19
2.4. TPM	20
2.5. MANUTENÇÃO AUTONOMA E MTBF	21
2.6. MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE.....	24
2.7. CRITÉRIO DE ANÁLISE DE FALHA	27
2.7.1 Matrizes de Risco.....	28
2.7.2 Falha a nível do componente	28
2.8. MÉTODOS DE ANÁLISE DE FALHA	29
2.8. MÉTODOS DE CÁLCULOS DE CONFIABILIDADE	31
2.8.1 Modelos de Confiabilidade e Processo de Escolha.....	32
2.8.2 Cálculo de Manutenibilidade	36
2. METODOLOGIA.....	37
3.1. TIPOLOGIA DA PESQUISA	37
3.2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	37
3.3. APRESENTAÇÃO DA FERRAMENTA	38
3.4. APRESENTAÇÃO FERRAMENTA.....	41
3.5. AVALIAÇÃO INICIAL DE CONFIABILIDADE À MANUTENÇÃO.....	43
3.6. FERRAMENTAS DE ANÁLISE	44
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 PLANO DE AÇÃO E CONTRAMEDIDAS	48

4.2 RESULTADOS PÓS-IMPLEMENTAÇÃO	50
4.3 NOVA CONFIABILIDADE	51
4. CONCLUSÃO	57
5. REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

A indústria vem passando por mudanças significativas ao longo das últimas décadas, com transformações que impactam diretamente a forma como os processos são executados. A Quarta Revolução Industrial, evidencia a crescente importância da eficiência e da competitividade para garantir a relevância das empresas no mercado atual. Neste contexto, a melhoria contínua dos processos se torna fundamental para acompanhar as demandas do setor e assegurar o sucesso das organizações (RUBMANN, 2015; WEF, 2017; SALESFORCE, 2018). Portanto, as organizações devem estar sempre aptas a desenvolver novas ferramentas para otimizar seus processos e agregar valor aos seus produtos que são oferecidos ao mercado consumidor, tonando-se mais competitivos e agregando mais valor à marca (ALMEIDA, 2020).

Para Sousa (2019), a confiabilidade no processo produtivo está diretamente relacionada com a manutenção dos equipamentos, pois falhas em máquinas podem gerar acidentes de trabalho, defeitos nos produtos ou interrupção repentina da produção. Essa interrupção pode acarretar em lucro cessante sendo amplificado quando o equipamento apresenta alta complexidade para reparos ou dificuldade para adquirir peças de reposição.

A presente monografia tem como tema o desenvolvimento de uma ferramenta em *Power Apps*® para equipes autônomas em indústria de grande porte, focando na aplicação na confiabilidade e autonomia dos processos de manutenção. O trabalho irá abordar a relevância de um banco de dados de falha completo para a geração de dados estatísticos e de confiabilidade a nível de componente, destacando a importância desses dados na manutenção centrada em confiabilidade e, conseqüentemente, na redução do TMC nas indústrias ao redor do mundo, que será garantida através do ganho de disponibilidade de máquina e aumento da confiabilidade dos processos.

A motivação para a escolha do tema reside na crescente presença da Indústria 4.0 no cenário atual e na busca por soluções que possam agregar valor aos processos de manutenção, garantindo maior eficiência e competitividade. O objetivo principal deste estudo é correlacionar, por meio de um caso real em uma empresa

multinacional do ramo alimentício, os conceitos de manutenção autônoma aplicados à Indústria 4.0 à utilização de ferramentas digitais, como o *Power Apps*®, em um ambiente fabril.

Ao aumentar a confiabilidade dos processos de manutenção, as empresas podem alcançar uma diminuição no TMC. Isso se deve ao fato de que processos mais confiáveis resultam em menos paradas não planejadas, menores custos com reparos e substituições de componentes, e maior disponibilidade de máquina. Com a redução de falhas e a otimização da manutenção, os custos associados ao tempo de inatividade e à reposição de peças diminuem significativamente, contribuindo para a redução do TMC.

A estrutura do trabalho está organizada da seguinte forma: primeiramente, será apresentada a evolução da indústria ao longo dos anos, abordando o panorama atual das indústrias ao redor do mundo e no Brasil. Em seguida, será discutido o conceito de Indústria 4.0 e a relevância da TPM dentro deste contexto. Posteriormente, serão abordados os temas de manutenção autônoma e o papel da confiabilidade de manutenção dentro da indústria. A monografia apresentará, então, um estudo de caso detalhado, os resultados alcançados e, por fim, a conclusão acerca do tema proposto.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

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

- Elaboração de dashboard que categoriza as falhas, as diferenciando por origem (mecânica ou eletrônica) e que ilustre a eficiência de contramedidas;
- Análise dos indicadores pós-implementação dos resultados.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

- Analisar a Evolução da Indústria e o Impacto da Quarta Revolução Industrial: Examinar as transformações significativas que ocorreram nas últimas décadas, com ênfase na eficiência, competitividade e importância da melhoria contínua dos processos em um contexto de mudança industrial.

- Explorar a Confiabilidade no Processo Produtivo e Manutenção Autônoma: Investigar como a confiabilidade e a manutenção autônoma de equipamentos influenciam a segurança do trabalho, a qualidade do produto e a continuidade da produção, especialmente em ambientes industriais de grande porte.
- Desenvolver e Avaliar Ferramentas Digitais para Otimização de Processos: Criar e implementar uma ferramenta em Power Apps© voltada para equipes autônomas, e avaliar a eficácia de ferramentas como o Power BI© na análise e interpretação de dados para aprimoramento dos processos de manutenção.
- Demonstrar a Importância da Digitalização de Dados e Análises para a Eficiência Operacional: Evidenciar como a coleta, armazenamento e análise digital de dados, especialmente em relação às falhas, contribuem para a eficiência operacional e estratégias de manutenção mais precisas.
- Avaliar o Impacto da Transformação Digital na Gestão de Manutenção: Discutir como a transformação digital, por meio de ferramentas como Power Apps© e Power BI©, revoluciona a gestão de manutenção, tornando as indústrias mais ágeis, resilientes e competitivas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

A evolução industrial é um tema de fundamental importância no campo da engenharia, uma vez que o entendimento das transformações históricas é crucial para o desenvolvimento de soluções inovadoras e eficientes. Esta revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar uma análise das principais etapas da evolução industrial ao redor do mundo, com base em literatura acadêmica e fontes confiáveis.

Segundo SCWAB (2016, Fig. 1), a primeira revolução industrial, ocorrida entre 1760 e 1840, foi marcada pelo desenvolvimento de tecnologias como a máquina a vapor e a mecanização da indústria têxtil. A Grã-Bretanha foi pioneira neste processo, estabelecendo as bases para o surgimento da engenharia moderna e influenciando outras nações europeias e os Estados Unidos.

Na segunda revolução industrial, que aconteceu entre 1870 e 1914, surgiram os primeiros barcos de aço movidos por potentes motores a vapor, revolucionando o transporte de mercadorias. Surgiram também as primeiras linhas de produção que viam permitir a produção em massa e a baixos custos (SCHWAB, 2016).

Conforme Machado (2016, Fig. 1), a terceira revolução industrial, também chamada de revolução digital, ocorreu entre 1960 e 1990, sendo marcada pela crescente automação e informatização dos processos produtivos. Isso significou a necessidade de adaptação e aquisição de novas competências relacionadas às tecnologias da informação e comunicação (TICs) e ao desenvolvimento de microeletrônicos, além de domínio de áreas como controle e automação, robótica e simulação computacional.

Durante o período pós-Segunda Guerra Mundial, os métodos de produção japoneses ganharam destaque no cenário industrial. A produção enxuta e o início do desenvolvimento do *Lean Manufacturing* foram notáveis contribuições que permitiram a redução de desperdícios e a melhoria contínua dos processos produtivos.

Atualmente, a indústria 4.0 (Fig. 1) tem demandado um constante aprimoramento em tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e robótica avançada (SCWAB, 2016). Essas inovações têm transformado os processos produtivos, exigindo uma visão integrada e interdisciplinar por parte dos

profissionais da área.

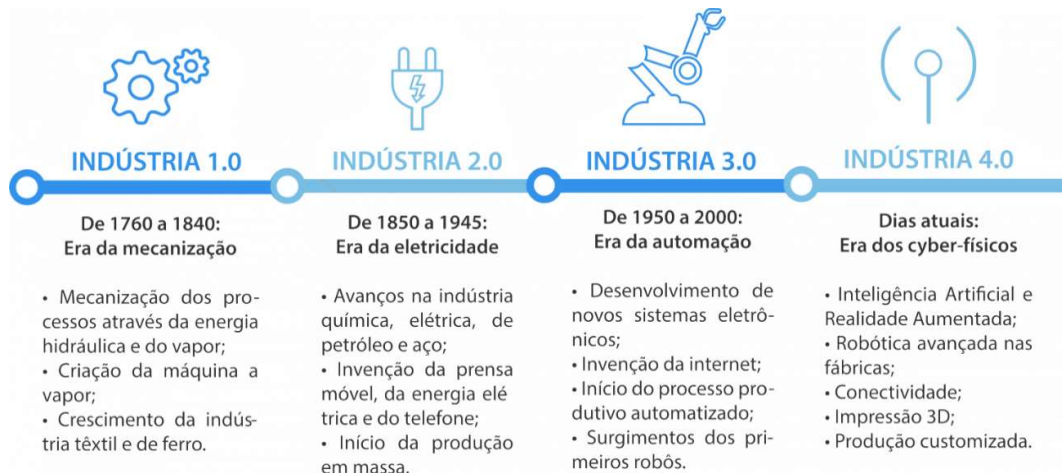


Figura 1. Revoluções industriais (SENAI, 2019)

2.2. MOMENTO ATUAL INDUSTRIAL BRASILEIRO

Segundo Lasi *et al.* (2014), a indústria global tem passado por mudanças significativas nas últimas décadas, principalmente devido aos avanços tecnológicos e à crescente globalização. A Indústria 4.0 é caracterizada pela integração de tecnologias digitais, como a IoT, IA e robótica avançada, nas operações industriais. Essas tecnologias têm o potencial gerar ambientes de manufatura altamente flexíveis e auto ajustáveis à demanda crescente por produtos cada vez mais customizados (SEBRAE, 2019). A importância da adoção e adaptação a essas tecnologias é crucial para garantir a competitividade no mercado global. Nesse sentido, empresas de todos os portes procuram investir em inovação e adotar essas tecnologias emergentes para se manterem à frente da concorrência.

Para Makhitek (2018), em face dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e a finitude de recursos, a indústria tem colocado a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental no centro de suas estratégias. Práticas ecoeficientes, como a economia circular e a adoção de energias renováveis, têm mostrado ser benéficas não apenas para o meio ambiente, mas também para a saúde financeira das empresas. Independentemente de seu porte, as organizações vêm adotando essas abordagens para reforçar sua reputação e posição no mercado global.

A globalização moldou uma complexa teia de cadeias de suprimentos, estendendo-se por fronteiras e conectando economias (Hompel; Kerner, 2015).

Porém, a recente pandemia de COVID-19 trouxe à tona as vulnerabilidades desse sistema interconectado. Em resposta, várias empresas estão recalibrando suas estratégias, buscando fontes de fornecimento mais próximas e diversificadas, que ofereçam maior resiliência em tempos incertos.

A marcha implacável da automação e digitalização está redefinindo o mercado de trabalho, instigando a demanda por habilidades atualizadas. Investir em educação e capacitação emergiu como uma resposta lógica, com organizações focando no crescimento e na requalificação de seus talentos para se adaptarem a esta nova era industrial.

Por último, em um mercado global que evolui constantemente, inovação e pesquisa e desenvolvimento (P&D) se destacam como impulsionadores essenciais da competitividade. Empresas, sejam elas emergentes ou estabelecidas, estão cada vez mais voltadas para a exploração de novos materiais, técnicas de produção e abordagens de negócios, buscando se destacar e prosperar.

Em relação ao Brasil, o país enfrenta desafios e oportunidades no contexto da indústria global. Historicamente, o Brasil tem um papel importante na produção de *commodities* e bens de consumo, mas sua participação no setor industrial de alta tecnologia ainda é limitada. O país tem potencial para se beneficiar das tendências da Indústria 4.0 e da crescente demanda por soluções sustentáveis, mas é necessário um investimento significativo em infraestrutura, educação e capacitação da força de trabalho.

O Brasil também enfrenta desafios na área de inovação e P&D, com um investimento público e privado em pesquisa ainda aquém do desejado. Para melhorar a competitividade do país, é essencial que o Brasil aumente seu investimento em inovação e estabeleça parcerias entre governo, empresas e instituições de pesquisa.

Nos últimos anos, houve um aumento de indústrias brasileiras que adotaram essas novas ferramentas. Entre 2016 e 2018, o percentual de empresas que passaram a usar pelo menos uma tecnologia cresceu de 63 % para 73 %, de acordo com pesquisa realizada pela Confederação Nacional da Indústria sobre o cenário da Indústria 4.0 no Brasil (SANKHYA, 2021)

Em resumo, as transformações na indústria global apresentam desafios e oportunidades para empresas e países. A capacidade de se adaptar às mudanças tecnológicas, investir em práticas sustentáveis, criar cadeias de suprimentos resilientes e preparar a força de trabalho para o futuro será crucial para o sucesso na economia

global. O Brasil, em comparação com o resto do mundo, tem potencial para crescer e se posicionar como um importante ator na indústria global, mas é necessário um esforço conjunto de todos os setores para enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades.

2.3. INDÚSTRIA 4.0 E SEUS DESAFIOS

A Indústria 4.0, também conhecida como a quarta revolução industrial, representa uma transformação significativa no setor industrial por meio da integração de tecnologias digitais, automação e troca de informações em tempo real (Schwab, 2016). Os principais desafios enfrentados na implementação da Indústria 4.0 no século 21:

- **Segurança cibernética na indústria 4.0:** A cibersegurança é a peça-chave para que todos esses processos, equipamentos, sensores, robôs e colaboradores possam utilizar todas as ferramentas acima do sistema, sem que haja vazamento de informações e/ou alterações indesejáveis ao longo dos processos podendo até levar a parada de toda a produção. Para isto, recomenda-se a internet fechada e um sistema de criptografia que não permita o compartilhamento de dados com a internet. Como meio de saída de informações é sugerível que saiam somente impressas no papel. O acesso a essas informações tendem a ser controlado por cada usuário do sistema de acordo com as restrições estabelecidas (Silva, 2022).

- **Demanda por profissionais com habilidades específicas:** Na indústria 4.0, tem-se claramente uma demanda por profissionais com habilidades específicas, principalmente em áreas como inteligência artificial, análise de dados e automação, que são essenciais para a implementação bem-sucedida da Indústria 4.0. Dessa forma, faz-se necessário o investimento em capacitação e requalificação dos colaboradores, bem como a atração de talentos com habilidades adequadas.

- **Integração de sistemas e tecnologias:** Para Sankhia (2021), a integração de diferentes sistemas e tecnologias é fundamental para a Indústria 4.0. A interoperabilidade entre sistemas pode ser desafiadora, devido à diversidade de soluções tecnológicas e à necessidade de padronização. Por isso cada vez mais é necessário a colaboração entre empresas, fornecedores e parceiros para desenvolver soluções integradas.

- **Tecnologias emergentes e manutenção eficaz:** A rápida evolução das

tecnologias emergentes apresenta oportunidades e desafios para a Indústria 4.0. O investimento em pesquisa e desenvolvimento e a adoção de novas tecnologias de maneira estratégica são pontos cruciais para o desenvolvimento das indústrias no cenário atual. Além disso, segundo Nakajima (1988) a adoção de abordagens de manutenção eficazes, como a Manutenção Produtiva Total (TPM) e a Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), na Indústria 4.0 do século 21 tem sua relevância para o desenvolvimento industrial. A TPM e a RCM ajudam as empresas a melhorar a eficiência operacional, reduzir o tempo de inatividade e aumentar a confiabilidade dos ativos, tornando-se componentes essenciais para a gestão eficiente e sustentável dos recursos industriais.

2.4. TPM

O TPM foi desenvolvido no Japão na década de 1970 como uma resposta à necessidade de melhorar a eficiência das operações de manutenção e aumentar a disponibilidade de equipamentos (Suzuki, 1994). A metodologia se baseia na filosofia de que a manutenção é responsabilidade de todos na organização, e não apenas do departamento de manutenção (Nakajima, 1988). Isso significa que a TPM busca integrar a manutenção em todas as áreas da organização, desde a alta gerência até os operadores de máquinas.

A metodologia TPM é fundamentada em oito pilares que abrangem todos os aspectos da manutenção produtiva (Nakajima, 1988):

- Melhoria Focada;
- Manutenção Autônoma;
- Manutenção Planejada;
- Melhoria da Qualidade;
- Treinamento e Educação;
- Segurança, Saúde e Meio Ambiente;
- Gestão Inicial do Equipamento;
- TPM em Escritórios Administrativos

Dessa forma, a implementação bem-sucedida do TPM requer mudanças culturais e organizacionais, assim como o comprometimento da alta gerência e o envolvimento de todos os funcionários.

A metodologia TPM tem sido amplamente estudada e aplicada em diversas indústrias ao redor do mundo, com resultados positivos em termos de eficiência, produtividade e qualidade. A literatura sobre TPM destaca a importância da responsabilidade compartilhada pela manutenção, a adoção dos oito pilares e o comprometimento da alta gerência para garantir uma implementação bem-sucedida.

As pequenas e grandes companhias que se beneficiaram da metodologia demonstram que o TPM pode trazer benefícios significativos para as organizações, como a redução do tempo de parada das máquinas, a melhoria na eficiência geral do equipamento e a otimização da qualidade do produto. No entanto, é importante ressaltar que a implementação bem-sucedida do TPM requer uma mudança cultural e organizacional, o envolvimento de todos os funcionários e um compromisso de longo prazo com a melhoria contínua.

2.5. MANUTENÇÃO AUTONOMA E MTBF

A manutenção autônoma é um dos pilares fundamentais da metodologia TPM e desempenha um papel crucial na melhoria da eficiência e na redução das paradas de máquinas na indústria (Nakajima, 1988; Suzuki, 1994). O conceito por trás da manutenção autônoma é capacitar os operadores de máquinas para realizar atividades básicas de manutenção, como limpeza, inspeção e lubrificação. Essas atividades contribuem para a melhoria do Tempo Médio Entre Falhas (MTBF - *Mean Time Between Failures*), um indicador-chave de desempenho na manutenção industrial (Moblely, 2002). Ele representa o tempo médio entre falhas, definido pela razão entre o tempo disponível de máquina sobre o número de ações corretivas menos “uma unidade”. Representado pela seguinte Eq. (1):

$$MTBF = \frac{\text{Tempo útil disponível} - \text{Tempo de parada}}{\text{Número de paradas}} \quad (1)$$

O MTBF é uma medida importante do desempenho da manutenção, pois representa o tempo médio entre falhas sucessivas de um sistema ou equipamento (Mobley, 2002). “O MTBF é usado para analisar a confiabilidade e a disponibilidade dos ativos, sendo um indicador-chave para a eficácia das atividades de manutenção” (Smith, 1993).

A manutenção autônoma visa aumentar a conscientização dos operadores sobre o estado dos equipamentos e promover a responsabilidade compartilhada pela manutenção (Nakajima, 1988). Ao realizar atividades básicas de manutenção, os operadores se tornam mais familiarizados com os equipamentos e são capazes de identificar problemas em estágios iniciais, evitando falhas mais graves e paradas não planejadas. “A manutenção autônoma também permite que os profissionais de manutenção se concentrem em atividades mais avançadas e estratégicas, melhorando a eficiência geral da manutenção” (Wireman, 2004).

A implementação da manutenção autônoma geralmente segue sete etapas, conforme descrito por Nakajima (1988):

- **Limpeza Inicial:** Os operadores limpam e inspecionam minuciosamente os equipamentos, identificando áreas problemáticas e fontes de sujeira.

- **Eliminação das Fontes de Contaminação e Melhoria Inacessível:** Os operadores trabalham com a equipe de manutenção para eliminar as fontes de contaminação e melhorar áreas de difícil acesso, facilitando a limpeza e a inspeção futuras.

- **Desenvolvimento de Padrões de Limpeza e Lubrificação:** São estabelecidos padrões para a limpeza e lubrificação dos equipamentos, garantindo que as atividades sejam realizadas de maneira consistente e eficiente.

- **Inspeção Geral e Manutenção Autônoma:** Os operadores realizam inspeções gerais dos equipamentos, verificando itens como desgaste, vibração e temperatura. Qualquer problema identificado é comunicado à equipe de manutenção.

- **Inspeção e Manutenção Autônoma Avançada:** Os operadores recebem

treinamento adicional para realizar inspeções e manutenção mais avançadas, como a substituição de componentes e a análise de falhas.

- **Padronização e Controle do Processo:** Os padrões de manutenção autônoma são estendidos a outros equipamentos e áreas da planta, e os processos são continuamente monitorados e melhorados.

- **Melhoria Contínua:** A organização se compromete com a melhoria contínua, revisando e ajustando os padrões de manutenção autônoma conforme necessário.

Neste contexto, A implementação bem-sucedida da manutenção autônoma pode proporcionar uma série de benefícios para as organizações, incluindo:

- **Redução do tempo de parada das máquinas:** Ao capacitar os operadores para identificar e resolver problemas em estágios iniciais, a manutenção autônoma pode reduzir significativamente o tempo de parada das máquinas e melhorar a disponibilidade dos equipamentos.

- **Melhoria na qualidade do produto:** Os operadores que estão familiarizados com os equipamentos e realizam inspeções regulares são mais capazes de identificar e corrigir problemas de qualidade, resultando em produtos de melhor qualidade e menos retrabalho.

- **Aumento da eficiência geral do equipamento (OEE):** A manutenção autônoma pode levar a um aumento na OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) por meio da redução do tempo de parada, aumento da produtividade e melhoria da qualidade do produto (Favaretto, 2006).

- **Maior envolvimento e satisfação dos funcionários:** Os funcionários que participam ativamente da manutenção autônoma tendem a se sentir mais envolvidos e comprometidos com o trabalho, o que pode levar a uma maior satisfação e retenção de funcionários.

- **Otimização dos recursos de manutenção:** Ao delegar atividades básicas de manutenção aos operadores, os profissionais de manutenção podem se concentrar em atividades mais avançadas e estratégicas, otimizando o uso dos recursos de manutenção.

A manutenção autônoma pode levar a uma melhoria no MTBF, que é uma medida importante do desempenho do equipamento. Ao capacitar os operadores

para realizar atividades de manutenção básicas e identificar problemas em estágios iniciais, a manutenção autônoma pode aumentar o MTBF, resultando em um desempenho mais confiável e menos interrupções na produção.

Ao empoderar os operadores e promover a responsabilidade compartilhada pela manutenção, a manutenção autônoma pode levar a uma redução no tempo de parada das máquinas, melhoria na qualidade do produto e otimização dos recursos de manutenção. Para obter sucesso na implementação da manutenção autônoma, é fundamental seguir as etapas estabelecidas conforme abordados por Nakajima (1988) e garantir o envolvimento e o comprometimento de toda a organização.

2.6. MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

A manutenção centrada em confiabilidade (MCC) é uma abordagem de gestão de manutenção focada na otimização da confiabilidade, disponibilidade e eficácia geral dos equipamentos e sistemas. Diversos autores têm discutido os princípios fundamentais da MMC e suas implicações para a gestão de manutenção. A MCC baseia-se em três conceitos principais: confiabilidade, disponibilidade e eficácia geral dos equipamentos. Esses conceitos são essenciais para entender e aplicar a MMC em qualquer organização.

- **Confiabilidade:** Consiste na probabilidade de um equipamento ou sistema funcionar sem falhas durante um período específico sob condições estabelecidas (Sousa, 2019). A MMC busca melhorar a confiabilidade por meio da identificação e eliminação das causas de falhas.

- **Disponibilidade:** Branco Filho (2006) define a disponibilidade é a probabilidade de um equipamento ou sistema estar disponível para uso (produzir) ou sendo usado (produzindo). A MCC procura aumentar a disponibilidade, reduzindo o tempo de inatividade e garantindo que os recursos estejam prontos para uso sempre que necessário.

- **Eficiência geral dos equipamentos (EGE):** Nakajima (1988) introduziu o conceito de EGE, que representa a eficiência com que um equipamento ou sistema realiza suas funções. A MMC visa otimizar a EGE por meio do equilíbrio entre manutenção preventiva e corretiva, garantindo o máximo de produtividade e o mínimo de custos.

Vários estudos têm destacado os benefícios da adoção da MCC nas organizações, incluindo a redução de custos, maior vida útil dos ativos, aumento da produtividade e melhoria da segurança. Como benefícios, podemos destacar:

- **Redução de custos:** A MMC ajuda a reduzir custos de manutenção, melhorando a eficiência operacional e minimizando o tempo de inatividade dos equipamentos.

- **Maior vida útil dos ativos:** Ao otimizar as práticas de manutenção, a MMC prolonga a vida útil dos equipamentos e reduz a necessidade de substituições prematuras.

- **Aumento da produtividade:** Com menos falhas e interrupções, a MMC aumenta a produtividade dos sistemas e processos.

- **Melhoria da segurança:** A manutenção centrada em confiabilidade contribui para a redução de acidentes e falhas operacionais, resultando em um ambiente de trabalho mais seguro.

A implementação da MMC em uma organização envolve várias etapas, incluindo análise de falhas, priorização e planejamento de atividades de manutenção.

- **Análise de falhas:** Consiste na identificação das falhas potenciais e suas causas em cada equipamento ou sistema, com a ajuda de especialistas e utilizando ferramentas como a Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA).

- **Priorização:** Consiste na classificação das falhas identificadas de acordo com a gravidade, frequência e detecção, para determinar a prioridade das atividades de manutenção.

Assim, a MCC e o TPM possuem objetivos que se complementam e podem ser integrados na gestão da manutenção industrial. A interação entre essas duas metodologias pode resultar em ganhos significativos em termos de confiabilidade e eficiência dos ativos. Algumas das possíveis sinergias incluem:

- **Estratégias de manutenção combinadas:** A combinação das abordagens de MCC e TPM pode levar a uma estratégia de manutenção mais abrangente, abordando tanto os aspectos de confiabilidade quanto de eficiência dos ativos (Moubray, 1997; Nakajima, 1988). A integração dessas duas metodologias permite a realização de atividades de manutenção de forma mais eficiente, otimizando recursos e reduzindo o tempo de parada das máquinas.

Além do mais, rotinas da Manutenção Autônoma como limpeza, inspeção e lubrificação garantem uma maior vida útil e confiabilidade das rotinas de manutenção, bem como a integração com o processo de geração de contramedidas pelos times operacionais.

- **Compartilhamento de conhecimento e experiência:** A interação entre a MCC e o TPM também pode promover o compartilhamento de conhecimentos e experiências entre diferentes áreas da organização, como a equipe de manutenção, operadores e gestores. Isso pode facilitar a identificação de melhorias e oportunidades de aprimoramento, além de estimular a criação de uma cultura de manutenção proativa e responsabilidade compartilhada.

- **Abordagem sistêmica e holística:** A combinação da MCC e do TPM permite uma abordagem sistêmica e holística para a gestão da manutenção industrial, considerando aspectos como análise de falhas, planejamento e programação de manutenção, e melhoria contínua. Moubrey (1997) afirma que a manutenção centrada em confiabilidade ajuda a identificar as ações de manutenção mais eficazes para cada ativo, levando em consideração os modos de falha e as consequências das falhas. Isso permite uma análise mais aprofundada dos componentes críticos e das ações de manutenção necessárias para mitigar os riscos associados.

Por outro lado, o TPM tem como objetivo de maximizar a eficiência geral do equipamento e eliminar as perdas que afetam a produtividade (Nakajima, 1988). Essa abordagem holística inclui a análise de todos os aspectos do processo produtivo, como a operação, a manutenção, a qualidade e a segurança, para garantir a eficiência e a eficácia das ações de manutenção.

Integrando as abordagens da MCC e do TPM, é possível obter uma visão mais abrangente da manutenção industrial, que considera tanto os aspectos de confiabilidade quanto de eficiência dos ativos. A combinação das duas metodologias permite uma abordagem sistêmica, onde as atividades de manutenção são priorizadas com base em critérios de risco e impacto, alinhando os esforços de manutenção com os objetivos estratégicos da organização.

Ao abordar a manutenção de forma sistêmica e holística, as organizações podem tomar decisões mais informadas e direcionar seus esforços de manutenção de maneira mais eficaz. Como resultado, é possível alcançar melhorias contínuas na confiabilidade, disponibilidade e eficiência dos ativos

industriais, otimizando recursos e reduzindo o tempo de parada das máquinas.

2.7. CRITÉRIO DE ANÁLISE DE FALHA

A análise de falhas e a priorização são fundamentais para a gestão de manutenção e melhoria da confiabilidade dos equipamentos e sistemas em uma organização. Segundo Moubray (1997), após a identificação de uma falha funcional, deve-se “identificar todos os eventos que são razoavelmente prováveis de causar cada estado de falha”. Estes eventos são denominados de modos de falha. É fundamental identificar a causa de cada falha, com o detalhe necessário, de modo a evitar que seja despendido tempo a analisar e a tratar sintomas e não causas das falhas.

Essas estratégias têm como objetivo identificar as causas de falhas, determinar a gravidade e frequência das falhas, e estabelecer ações corretivas e preventivas para otimizar a eficácia dos processos de manutenção. Diferentes metodologias e ferramentas são usualmente recomendadas para realizar análises de falhas, como a FMEA, Análise de Árvore de Falhas (FTA) e Análise de Causa Raiz (ACR).

- **FMEA:** Técnica amplamente utilizada para identificar e avaliar os modos de falha e seus efeitos em equipamentos e sistemas. O objetivo da FMEA é determinar as ações corretivas e preventivas necessárias para reduzir ou eliminar as falhas e seus impactos.

- **FTA:** Técnica usada na análise de falhas que envolve a construção de uma árvore de eventos para ilustrar as combinações de eventos causadores de falhas em um sistema. A FTA ajuda a identificar as causas primárias e secundárias das falhas e a determinar as medidas de mitigação apropriadas.

- **ACR:** A Análise de Causa Raiz é uma abordagem sistemática para identificar a causa fundamental das falhas e desenvolver soluções de longo prazo para preveni-las. A ACR é frequentemente usada em conjunto com outras técnicas, como FMEA e FTA, para fornecer uma análise de falhas mais abrangente.

2.7.1 Matrizes de Risco

A matriz de risco é uma ferramenta visual que ajuda a avaliar e priorizar as falhas com base em seus riscos e impactos. Ela utiliza uma combinação de critérios, como a probabilidade de ocorrência de uma falha, a severidade de suas consequências e a capacidade de detecção. As falhas são classificadas em categorias de risco, que podem ser usadas para direcionar os esforços de manutenção e prevenção.

- **Análise de Criticidade:** A análise de criticidade é uma abordagem que prioriza as falhas com base em seu impacto no desempenho do sistema e nos objetivos organizacionais. A criticidade é geralmente determinada por meio da avaliação do efeito das falhas nos indicadores-chave de desempenho (KPIs), como confiabilidade, disponibilidade e segurança.
- **Análise de Pareto:** A análise de Pareto, definida por Seleme e Stadler (2010) também conhecida como regra 80/20, é uma técnica estatística que ajuda a identificar as falhas mais críticas que contribuem para a maioria dos problemas. Ao focar nas falhas mais críticas, a organização pode direcionar recursos de manutenção para resolver os problemas mais impactantes e melhorar o desempenho geral do sistema.

2.7.2 Falha a nível do componente

No caso da falha a nível de componente, tem-se à falha de um componente individual dentro de um equipamento ou sistema. A análise de falhas e priorização a nível de componente é essencial para a gestão de manutenção e melhoria da confiabilidade, pois permite identificar e abordar as causas específicas das falhas e desenvolver soluções direcionadas para otimizar o desempenho dos componentes e prolongar sua vida útil.

As falhas a nível de componente podem ser classificadas com base em diferentes critérios, tais como: Corrosão, desgaste, erosão, fadiga, falhas elétricas ou eletrônicas, contaminação, vibração excessiva, sobreaquecimento, deformação ou empenamento, falta de aperto.

2.7.3 Geração de Contramedidas

Após identificar e classificar as falhas a nível de componente, o próximo passo é gerar contramedidas para abordar as causas das falhas e melhorar a confiabilidade do sistema. Algumas estratégias de contramedidas incluem:

- **Manutenção preventiva:** Realização de manutenção periódica para evitar falhas antes que ocorram.
- **Manutenção corretiva:** Reparos e substituições de componentes após a ocorrência de falhas.
- **Redesign de componentes ou sistemas:** Alterações no projeto para melhorar a confiabilidade e prolongar a vida útil.
- **Melhoria nos processos de fabricação e montagem:** Refinar processos para minimizar defeitos e garantir a qualidade dos componentes.
- **Treinamento e capacitação de funcionários:** Capacitar os funcionários nas melhores práticas de manutenção e operação.
- **Monitoramento e análise de condições:** Acompanhar o desempenho dos componentes em tempo real para detectar falhas precocemente e agir de forma proativa.
- **Gestão de fornecedores:** Selecionar fornecedores de alta qualidade e garantir a conformidade com as especificações.

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

2.8. MÉTODOS DE ANÁLISE DE FALHA

As ferramentas de análise de causa raiz são importantes para identificar a causa fundamental das falhas e desenvolver soluções de longo prazo para preveni-las. Algumas das principais ferramentas de análise de causa raiz incluem:

- **5 Whys (5 Porquês):** O 5 porquês é a ferramenta que dará a causa raiz do problema, ou seja, a causa raiz é apenas o resultado do estudo de uma não conformidade (IMAI, 2012). É uma ferramenta simples de resolução de

problemas que foi desenvolvida por Taiichi Ono (1997), pai do Sistema de Produção Toyota e consiste em formular a pergunta “Porquê” cinco vezes para compreender o que aconteceu (a causa-raiz).

- **5W2H:** Uma abordagem estruturada que utiliza as perguntas "What" (O quê), "Who" (Quem), "Where" (Onde), "When" (Quando), "Why" (Por quê), "How" (Como) e "How much" (Quanto) para investigar a causa raiz de um problema. Longaray *et al.* (2017) descreve esta técnica como um formato que aponta as ações prioritárias através de questões. Este formato permite organizar as diversas ações que deverão ser implementadas. O método é estruturado de maneira a permitir uma rápida identificação dos elementos necessários para a implementação de novos projetos.

- **Análise de Gaps (Análise de Lacunas):** Uma técnica que compara o desempenho atual de um sistema ou processo com o desempenho desejado, identificando as lacunas e suas causas.

- **Análise de Árvore de Causas (ACT):** Uma ferramenta gráfica que começa com o evento indesejado e trabalha de forma retroativa para identificar todas as causas possíveis e suas inter-relações.

- **Análise de Ishikawa (Diagrama de Espinha de Peixe):** Uma ferramenta gráfica que ajuda a identificar e organizar as possíveis causas de um problema, agrupando-as em categorias relacionadas (Santos, 2019). Este diagrama é útil também para a verificação de todas as possíveis causas de um problema que foram abordadas na definição da sua solução.

- **Análise de Eventos e Causalidade (ACE):** Uma metodologia que se concentra na identificação de eventos críticos que levaram à falha e na análise das relações causais entre esses eventos.

- **Método de Análise e Solução de Problemas (MASP):** Uma abordagem sistemática e estruturada para identificar, analisar e resolver problemas, baseada no ciclo PDCA e nas técnicas estatísticas.

Essas ferramentas podem ser usadas individualmente ou em combinação para realizar uma análise de causa raiz abrangente e eficaz, identificando as causas fundamentais das falhas e desenvolvendo soluções para preveni-las.

2.8. MÉTODOS DE CÁLCULOS DE CONFIABILIDADE

Maquinário industrial complexo é composto por uma variedade de elementos, componentes e subsistemas, com o objetivo de alcançar alto desempenho, confiabilidade e fácil manutenção. Uma vez estabelecida a função do subsistema e determinados os componentes, o engenheiro realiza uma estimativa da confiabilidade e identifica a relevância de cada componente para essa confiabilidade. Caso seja necessário, ele implementa redundâncias ou sistemas paralelos para atingir a confiabilidade almejada, sempre que possível, sem comprometer outros objetivos, como custo e desempenho (Lafraia, 2001; Elsayed, 1996).

O engenheiro também utiliza técnicas, como a FMEA, para identificar possíveis falhas e antecipar soluções, de forma que, se houver uma falha, seu impacto seja minimizado e a reparação ocorra no menor tempo possível. A complexidade do equipamento se evidencia nos inúmeros modos possíveis de falha e nas interações mútuas entre ele.

Elsayed (1996) oferece outra interpretação de confiabilidade. No caso de um item irreparável, como um satélite, a confiabilidade se refere ao período esperado de operação ininterrupta, de acordo com as condições do projeto.

Para itens que podem ser reparados, como equipamentos industriais, a confiabilidade é vista como a probabilidade de operar sem falhas durante um período específico, também nas condições do projeto. Esta interpretação apresenta a confiabilidade como uma função $R(t)$, onde o valor flutua entre 0 e 1. Em ambos os cenários, a confiabilidade pode ser utilizada como um indicador da eficácia de um projeto na realização de um objetivo específico (Elsayed, 1996).

O intervalo de tempo até a ocorrência de uma falha em um componente ou sistema é uma variável aleatória que adere a uma distribuição de probabilidade específica. Considerando que X_t seja uma variável aleatória que simbolize o tempo até a falha de um dispositivo, a função de confiabilidade $R(t)$ no momento t é definida pela Eq. 2. Caso exista uma expressão analítica $f(t)$ que represente a densidade de probabilidade de X_t , então a Eq. 3 é aplicável.

$$R(t) = \text{Probabilidade } [X_t > 1] \quad (2)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(\zeta) d\zeta \quad (3)$$

2.8.1 Modelos de Confiabilidade e Processo de Escolha

Os modelos de confiabilidade são fundamentais para entender o comportamento de falhas de um sistema ou componente e para tomar decisões sobre manutenção e melhoria de projeto (Rausand, 2004). Aqui estão alguns dos principais modelos de confiabilidade e possíveis combinações:

- **Modelos de Tempo Até a Falha (*Time-To-Failure Models*):** Esses modelos, como a distribuição Exponencial, Weibull e Log-normal, são usados para representar o tempo até a primeira falha de um sistema ou componente. Eles são frequentemente aplicados em sistemas ou componentes não reparáveis, ou seja, no qual as falhas são resolvidas com a troca do componente por um novo.

- **Modelos de Processos Pontuais (*Point Process Models*):** Esses modelos são usados para descrever a ocorrência de eventos (como falhas) ao longo do tempo em sistemas reparáveis. Os modelos mais comuns incluem o Processo de Poisson Homogêneo (HPP) e o Processo de Poisson Não Homogêneo (NHPP). O HPP assume uma taxa de falha constante, enquanto o NHPP permite uma taxa de falha que varia com o tempo.

- **Modelos de Estado de Sistema (*System State Models*):** Esses modelos são usados para descrever o estado de um sistema composto por vários componentes. Eles incluem modelos de série, paralelos e mistos. Os modelos de série assumem que o sistema falha se qualquer componente falhar, enquanto os modelos paralelos assumem que o sistema só falha se todos os componentes falharem. Os modelos mistos combinam elementos de ambos.

- **Modelos de Confiabilidade Baseados em Falhas (*Failure Based Reliability Models*):** Esses modelos usam dados históricos de falha para fazer previsões sobre a confiabilidade do sistema. Modelos de regressão, análise de sobrevivência e distribuições de Weibull e Exponencial são exemplos típicos.

Os modelos de confiabilidade podem ser combinados para lidar com sistemas complexos. Por exemplo, os modelos de Processo de Poisson podem

ser combinados com os modelos de Tempo Até a Falha para descrever a confiabilidade de sistemas reparáveis, como mencionado anteriormente. Além disso, os modelos de Estado de Sistema podem ser usados em conjunto com qualquer dos outros modelos para descrever sistemas compostos por vários componentes.

No presente objetivo deste trabalho, visto a característica dos equipamentos da indústria analisada, os equipamentos são repáveis e pode-se considerar que os equipamentos passam por tempo de reparo mínimo, e que retornam em condições de operações próximas ao momento anterior a falha.

Dessa forma o NHPP combina as forças de dois métodos, em que se utiliza a distribuição de Weibull para modelar o tempo até a falha, incorporando o fato de que a taxa de falha pode mudar ao longo do tempo. Por outro lado, a distribuição de Poisson é usada para modelar a quantidade de falhas que ocorrem em um determinado intervalo de tempo, levando em conta a possibilidade de que essas falhas possam ocorrer de forma independente.

Este modelo é particularmente útil para sistemas que podem ser reparados, onde a falha e o reparo podem alterar a condição do sistema e, portanto, sua taxa de falha futura. O NHPP permite que a taxa de falha varie com o tempo, refletindo as mudanças na condição do sistema à medida que ele falha e é reparado.

Em resumo, a integração das distribuições de Weibull e Poisson através do NHPP oferece uma maneira poderosa de modelar e analisar a confiabilidade de sistemas reparáveis, levando em conta tanto a variação na taxa de falha ao longo do tempo quanto a ocorrência independente de falhas. Ele é utilizado para análises de confiabilidade em sistemas reparáveis devido à função de intensidade permitir mudanças ou tendências na intensidade de falha de acordo com o tempo de vida t do sistema conforme a Eq. 4.

$$u(t) = \gamma \cdot \beta \cdot t^{\beta-1} \quad (4)$$

No contexto do Processo de Poisson Não Homogêneo (PPNH), a função de intensidade é dependente da idade t do sistema. O sistema pode manifestar uma etapa de aprimoramento, na qual a função de intensidade decresce, uma fase estável, na qual a função de intensidade permanece constante, ou uma fase

de deterioração do sistema, em que a função de intensidade aumenta. Matematicamente falando, isso indica que a função de intensidade de falha aumenta quando $\beta > 1$, decresce com $\beta < 1$ e torna-se constante com $\beta = 1$.

Se o sistema em questão é reparável e as falhas que impactam o sistema seguem um Processo de Weibull-Poisson, a probabilidade de que um sistema com idade t não falhe no intervalo $(t, t + \Delta t)$ é dada pela Eq. 5.

$$R(t) = e^{-[\gamma(t+\Delta t)^\beta - \gamma.t^\beta]} \quad (5)$$

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

$$\gamma = \frac{N}{k \cdot T^\beta} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{N}{\sum_{q=1}^k \sum_{i=1}^{N_q} \ln \frac{T}{X_{iq}}} \quad (7)$$

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

A "curva da banheira" é um conceito amplamente reconhecido e fundamentado na literatura de engenharia de confiabilidade. Este conceito é frequentemente utilizado para representar o ciclo de vida de um componente ou sistema, tendo recebido este nome devido à sua forma gráfica, que se assemelha a uma banheira vista de lado.

A curva é geralmente composta por três fases distintas, cada uma delas correspondendo a uma fase específica no ciclo de vida de um sistema ou

componente: período de "queima", período de "vida útil" e período de "desgaste" (Abernethy, 1996), sendo conhecidos também como fases de "mortalidade infantil", "maturidade" e "mortalidade senil", respectivamente conforme representado na Fig. 2.

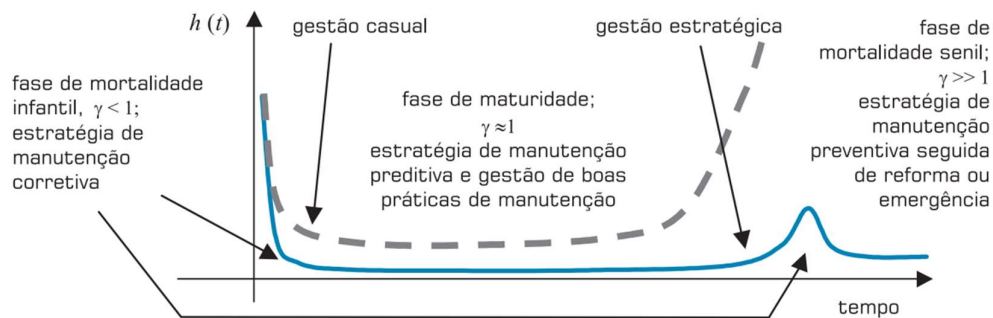


Figura 2. Curva de banheira (Selitto, 2005).

O período de "mortalidade infantil" é caracterizado como o momento inicial após a instalação de um novo equipamento, quando as falhas são mais prováveis. Essas falhas geralmente se originam de defeitos de fabricação, erros de instalação ou outros problemas iniciais (Jardine; Tsang, 2013).

O período de "maturidade" representa a fase mais longa, durante a qual a taxa de falhas é relativamente constante e baixa. Durante este período, o sistema ou componente está normalmente em operação conforme o esperado.

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

A curva da banheira se revela uma ferramenta extremamente útil para a gestão de manutenção, pois auxilia na determinação da estratégia de manutenção mais adequada para diferentes pontos do ciclo de vida de um componente. Durante o período de "queima", é recomendável a realização de manutenção ou inspeções mais frequentes para detectar e corrigir falhas precoces. No período de "vida útil", estratégias de manutenção preventiva ou preditiva são frequentemente mais. Já no período de "desgaste", pode ser mais econômico planejar a substituição do componente.

Em suma, a curva da banheira fornece insights valiosos sobre o comportamento de falha ao longo do tempo, possibilitando que os gestores de manutenção planejem e implementem estratégias de manutenção de maneira eficaz e eficiente (Jardine; Tsang, 2013).

2.8.2 Cálculo de Manutenibilidade

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

$$MTBF = \frac{\text{Tempo de parada}}{\text{Número de paradas}} \quad (8)$$

O MTTR e a função de confiabilidade $R(t)$ são combinados para formar um indicador abrangente de desempenho do sistema, a disponibilidade. Esta métrica holística serve como uma ferramenta valiosa na avaliação do sucesso de um projeto, já que contempla tanto a resistência do sistema ao processo de falha (capturada no MTBF) quanto a eficiência de reparo do mesmo (capturada no MTTR).

A disponibilidade fornece insights fundamentais para aperfeiçoar o projeto de sistemas complexos e instalações industriais, permitindo um balanceamento entre a robustez de um sistema (capacidade de resistir a falhas) e sua reparabilidade (facilidade e rapidez de reparo após a ocorrência de uma falha). A métrica mais comumente utilizada para quantificar a disponibilidade, particularmente relevante para equipamentos industriais, é determinada pela Eq. 9, conforme apresentado por Elsayed (1996).

$$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (9)$$

2. METODOLOGIA

Neste capítulo será exposta a metodologia utilizada para a implementação dos conceitos de manutenção autônoma aplicados à Indústria 4.0 à utilização de ferramentas digitais, como o *Power Apps*®, em um ambiente fabril.

3.1. TIPOLOGIA DA PESQUISA

Para a realização desse estudo, a abordagem do problema se caracteriza como quantitativa. Esse tipo de pesquisa precisa confirmação das hipóteses mediante a aplicação de dados estruturados, estatísticos, com pesquisa de número de casos representativos, recomendando um curso final da ação, conforme Mattar (2001).

Este trabalho utiliza como abordagem metodológica o estudo de caso, o qual, é definido por Triviños (1987) como um trabalho de caráter empírico que investigam dado fenômeno dentro de um contexto real contemporâneo por meio de análise de um ou mais objetos de análise (casos), possibilitando amplo e detalhado conhecimento sobre o fenômeno, permitindo inclusive a geração de teoria.

3.2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A Empresa em questão representa uma corporação multinacional de notável importância econômica no cenário brasileiro e internacional no ramo alimentício, estando presente em aproximadamente 5000 municípios e 180 países ao redor do mundo. Esta possui unidade fabril na cidade de Uberlândia, como sua única representante no Brasil desde o início dos anos 70. O grupo possui 240 mil funcionários e representa um portfólio que trás faturamento de US\$ 2.6 Bilhões (2013) e lucro de US\$ 719.4 Milhões (2013).

3.3. APRESENTAÇÃO DA FERRAMENTA

A ficha de falha (Fig. 3) é uma ferramenta indispensável na indústria, com um papel central na documentação e análise de falhas de máquinas, equipamentos ou processos. Além de coletar detalhes importantes como a data, a hora, a descrição do problema e as ações tomadas para solucioná-lo, a ficha de falha também serve para priorizar a resolução de problemas, considerando elementos como a complexidade do problema, o custo da falha e a frequência de ocorrência.

Ficha de Falha		<input type="checkbox"/> Falha de Componente <input type="checkbox"/> Falha de Processo
Esta seção deve ser completada pela pessoa (s) que observou / reparou falhas.		
Quem identificou:	Data da Falha:	Turno:
Equipamento:	Tempo de Parada hrs.: Início: Fim:	Tempo de Reparo hrs.: Início: Fim:
Número do Equipamento no SAP:	Horímetro do equipamento:	
Componente / Parte:	Número da Nota SAP:	
O que aconteceu?	Como foi reparado ou consertado?	
Esta seção deve ser completada com o recurso do time PM		
A quebra deveria ter sido detectada através de algum processo de AM ou Plano de Manutenção? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Chave do Gráfico de dados (Circule tudo que se aplica)	
Há outros equipamentos que requerem inspeção para evitar quebra <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Atividade - (O que você fez?)	Falha - (O que você viu?)
As parte necessárias para a troca estavam em estoque? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	AJUST AJUSTE ALM T ALINHAMENTO BLM T BALANCEAMENTO REIN REINICIALIZAÇÃO CLBC CALIBRAÇÃO LMPZ LIMPEZA CNFG CONFIGURAÇÃO LVGM LAVAGEM INSP INSPEÇÃO INST INSTALAÇÃO LUBF LUBRIFICAÇÃO REPR REPARO SUBS SUBSTITUIÇÃO RCBS RETORNO A CONDIÇÃO BASE REAL REALOCAÇÃO MTGM MONTAGEM ELMC ELIMINAÇÃO TEST TESTE (VERIFICAÇÃO) APRT APERTO DSBQ DESBLOQUEIO MNPR MANUTENÇÃO PREDITIVA	<i>Mecânica:</i> ABRASÃO CURVATURA QUEBRA CORROSÃO TRINCAMENTO DESGASTE DESCOLORAÇÃO FURO COMPRESSÃO <i>Elétrica:</i> FIO CURTO SOBRECARGA ALTO SUPRIMENT. DE VOLTAGE BAIXA VOLTAGE DANO POR ÁGUA DANO POR EXCESSO DE CALOR CONEXÃO QUEBRADA/FROUXA OXIDAÇÃO/CORROSÃO PERDA DE COMUNICAÇÃO FALHA DO SOFTWARE
Durante a quebra foi identificado a necessidade de alguma ferramenta? Qual?		
PORQUE HOUVE A QUEBRA DO COMPONENTE?		
PORQUE?		
PORQUE?		
PORQUE?		
PORQUE?		
PORQUE?		
Contramedida(s) Permanentes: (medidas tomadas para prevenir falhas futuras similares)		
OPÇÃO 1		
OPÇÃO 2		
OPÇÃO 3		
OPÇÃO 4		
OPÇÃO 5		
Caso seja necessário estressar novas ferramentas como FMEA, ACT, MASP, Ishikawa a fim de encontrar a causa raiz, deve-se anexar estas a essa ficha.	DICE CHART 	Causa (Por que aconteceu?) CONDIÇÕES BÁSICAS CONDIÇÕES DE MANUTENÇÃO CONDIÇÕES DE AMBIENTE CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO CONDIÇÕES DE CORRIDA CONDIÇÕES DE INSTALAÇÃO CONDIÇÕES DE PROCESSO CONDIÇÕES DE ESPECIFICAÇÃO/PROJETO

Figura 3. Exemplo de ficha de falha.

A complexidade do problema, o custo da falha e a frequência de ocorrência são informações essenciais para a priorização dos problemas e para

a alocação eficaz dos recursos de manutenção. A inclusão desses fatores na ficha de falha permite que os gestores tomem decisões informadas e estratégicas para maximizar a eficiência, minimizar os custos e melhorar a confiabilidade do equipamento.

No entanto, nem sempre é possível identificar a causa raiz de um problema apenas com as informações presentes na ficha de falha. Quando isso acontece, a ficha de falha torna-se fundamental para a decisão de aplicar outras técnicas de análise de falhas. Ferramentas como Árvore de Falhas, FMEA, Análise de GAPs, entre outras ferramentas de RCM que podem ser usadas para aprofundar a investigação e identificar as causas subjacentes das falhas.

Estas ferramentas avançadas permitem uma análise mais aprofundada das falhas, explorando possíveis cenários e estimando os efeitos e a gravidade das falhas. Com o auxílio da ficha de falha, as equipes de manutenção podem escolher a técnica de análise mais adequada para o problema em questão, auxiliando na tomada de decisão de maneira mais precisa e eficaz.

Assim, a ficha de falha não só desempenha um papel crucial na documentação e análise inicial de falhas, como também serve como um ponto de partida para análises mais detalhadas e complexas. Quando preenchida e utilizada corretamente, ela se torna uma ferramenta inestimável para a gestão eficaz da manutenção e para a melhoria contínua das operações industriais.

A proposta apresentada neste estudo é uma inovação significativa para a gestão de falhas na indústria: a digitalização da ficha de falha. Utilizando a ferramenta Microsoft *Power Apps*®, permite-se que a equipe de operações insira informações diretamente em um banco de dados do SharePoint. Tal implementação assegura que nenhum detalhe da falha seja perdido durante o processo e permite que cada incidente possa ser revisto para uma análise estratégica mais aprofundada, como mostra o fluxo da Fig. 4.



Figura 4.1 Fluxograma de trabalho inicial.



Figura 4.2 Fluxograma de trabalho pós ferramenta.

Um desafio comum na indústria é a qualidade do preenchimento da ficha de falha. A implementação proposta da ferramenta *Power Apps*® tem potencial para superar este obstáculo, ao possibilitar a inclusão de um fluxo de aprovações. Nesse processo, inicialmente a equipe de produção é responsável pelo preenchimento, e posteriormente os analistas de processo avaliam se a ficha contém todos os elementos necessários para a conclusão da análise e a implementação das contramedidas.

Inicialmente, todas as fichas de falha eram preenchidas de maneira física. O presente estudo avaliou a evolução de falhas deste mesmo conjunto ao longo de 2 anos - do 2º trimestre de 2021 ao 2º trimestre de 2023 –, desde o início das primeiras recorrências até a sua análise, resolução e reavaliação dos resultados pós-análises.

Inicialmente as informações acerca das falhas eram coletadas fisicamente através da ficha de falha impressa. Era realizado então uma análise do conjunto juntamente com o time da manutenção e posteriormente era reparado e enviado ao almoxarifado.

Ao longo dos dois primeiros trimestres havia-se a dificuldade de correlação entre as quebras ocorridas pelo fato das informações físicas não estarem unificadas em uma base de dados. Desta maneira, após a detecção de recorrências anormais de falhas neste conjunto, foi realizada a implementação da ficha de falha digital. Desta maneira, algumas informações e tendências foram capazes de ser identificadas, tais como:

- Recorrência de impacto por cada um dos onze conjuntos (através de controle por TAG);
- Recorrência de impacto por máquina;
- Identificação assertiva dos componentes internos em falha;

- Tempos de Falha;
- Fotografias das falhas.

A partir de dados mais estruturados, o setor de manutenção foi capaz de identificar quais eram os problemas mais comuns entre todas as falhas, e a partir de um direcionamento inicial, as análises de falhas foram estruturadas de maneira a aprofundar sobre as causas raízes e suas devidas ações para eliminação de impactos.

3.4. APRESENTAÇÃO FERRAMENTA

A indústria enfrentou um problema recorrente de quebras em nove máquinas idênticas, comprometendo a eficiência operacional e a entrega dos volumes de produção. As quebras provocaram períodos consideráveis de inatividade das máquinas, resultando em perdas de produção e, conseqüentemente, redução da lucratividade. O conjunto mecânico de rolagem e perfuração (Fig. 5) ao qual ocorreu um aumento significativo é utilizado de maneira coletiva entre as máquinas. A companhia possui onze conjuntos similares, sendo nove deles utilizados regularmente nas máquinas em produção e dois conjuntos sobressalentes utilizados para substituição em planos de manutenção ou em situações de indisponibilidade de máquina.

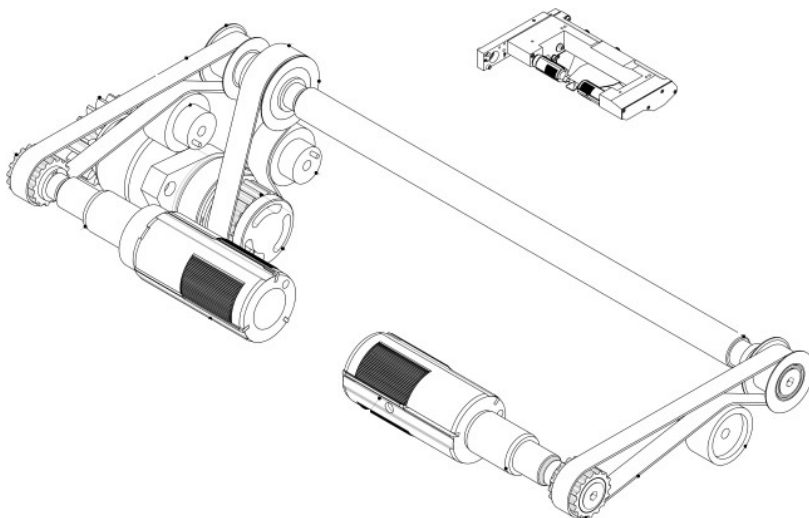


Figura 5. Conjunto Mecânico Rolagem e Perfuração.

O conjunto é acionado inicialmente por uma transmissão por engrenagens,

este movimento é transmitido então a uma primeira polia central, que por sua vez, através de uma correia dentada, retransmite o movimento principal para um eixo intermediário. Neste eixo, são acopladas mais duas polias, uma em cada extremidade, que realizam uma nova transmissão de movimento para dois eixos finais, e estes eixos realizam o movimento rotativo de dois rolos que entram em contato final com o produto.

Em suma, a transmissão do conjunto vem originalmente do movimento cinemático geral do equipamento, e internamente o conjunto avaliado retransmite este movimento para dois rolos finais, que entrarão em contato com o produto conforme o diagrama de tempos e movimentos necessário da máquina.

De maneira sucinta, o conjunto mecânico (Fig. 6) comporta os seguintes componentes internos:

- Engrenagem;
- Polias;
- Eixos;
- Rolamentos;
- Correias dentadas;
- Tensionadores de correia;
- Chavetas;
- Arruelas;
- Parafusos;
- Vedações;
- Anéis elásticos.

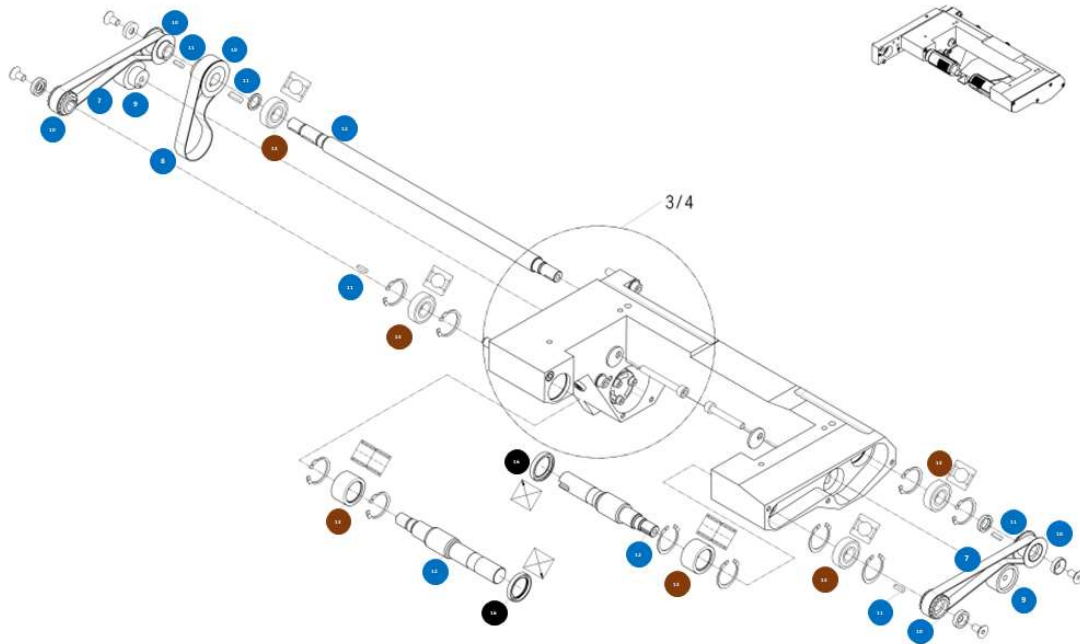


Figura 6. Vista Explodida Conjunto Mecânico Rolagem e Perfuração.

O fluxo de substituição deste conjunto é estruturado da seguinte maneira:

1. Durante atividade de manutenção preventiva ou em situação de substituição por falha mecânica, era realizado o processo de reserva do conjunto por uma ordem de serviço, e este conjunto sobressalente era então retirado no almoxarifado;

2. Após a retirada, o conjunto era substituído e ajustado conforme manual de ajuste mecânico da máquina;

3. Uma nova ordem de serviço para recuperação do conjunto era aberta. O conjunto era entregue, então, ao setor de manutenção de conjuntos sobressalentes para que fizesse os reparos necessários;

4. O conjunto era desmontado, avaliado, e então o processo de recuperação era iniciado. Em alguns casos exigia-se apenas trocas de componentes simples, como correias e rolamentos, e que já eram dimensionados em estoque interno. Em outros casos, exigia-se um pedido de compra de componentes internos específicos para reparo;

5. Após o reparo, a ordem de serviço criada para reparo era revertida para uma ordem de entrada de conjunto sobressalente ao almoxarifado.

3.5. AVALIAÇÃO INICIAL DE CONFIABILIDADE À MANUTENÇÃO

Com a implementação da ficha de falha digital, os dados de quebras tornaram-se acessíveis e análises instantâneas de confiabilidade foram capazes de serem realizadas. Ao se levantar o histórico de falhas nesta área da máquina, obteve-se um cenário inicial de confiabilidade da máquina.

Após a utilização das ferramentas de RCM, a confiabilidade do conjunto foi calculada: 27,52 % (Fig. 7). A partir disso, ficou evidente a necessidade de iniciar uma análise profunda para entender os principais gaps e direcionar para a resolução da falha e implementação de contramedidas.

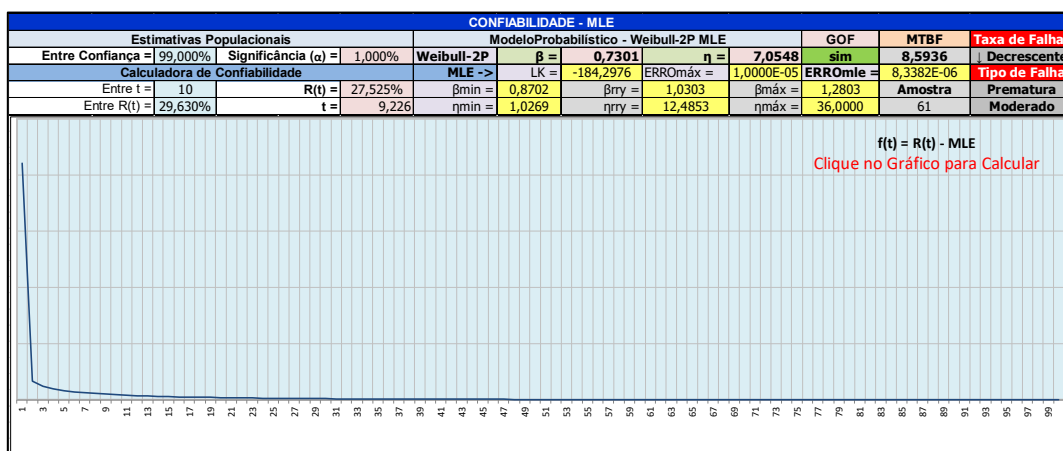


Figura 7. Tela de apresentação da confiabilidade inicial.

3.6. FERRAMENTAS DE ANÁLISE

Realizando uma análise inicial, constatou-se que o defeito de falha mais recorrente entre os conjuntos estava associado a rompimento ou danos nas correias de acionamento. Como características de falhas predominantes estavam: rompimento (Fig. 7a), quebra dos dentes (Fig. 7b), e desgaste na lateral das correias (Fig. 7c), conforme imagens correias.

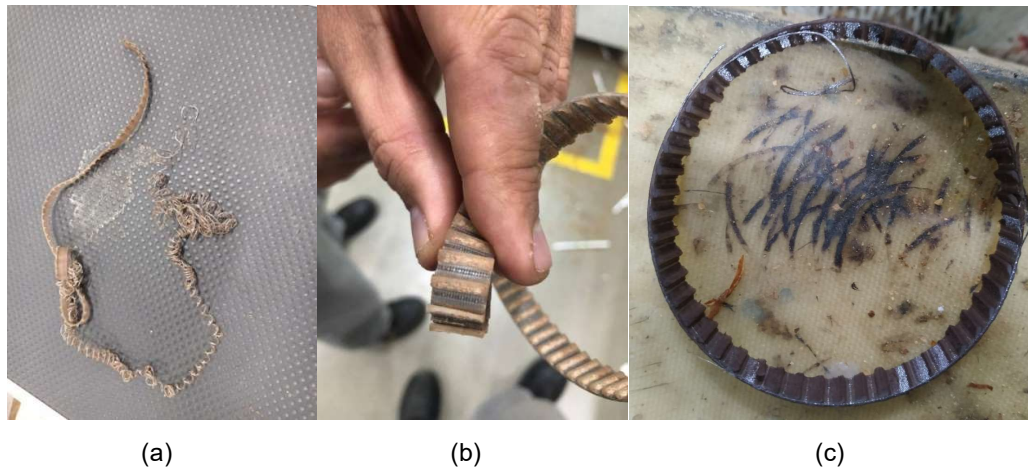


Figura 8. Exemplos de falhas em correias.

Identificado o componente mais crítico à falha, iniciou-se então uma análise mais aprofundada para entender os seus princípios de funcionamento e modos de falha característicos para este caso. Para isso, uma equipe multidisciplinar foi criada e foi desenvolvido uma FMEA.

Através do FMEA (Fig. 8), foram levantados todos os modos de falhas possíveis do conjunto, com seus respectivos graus de Ocorrência, Detecção e Severidade. Através da análise quantitativa destes três itens, realizou-se uma multiplicação destes termos que retornaram valores finais de RPN (Risk Priority Number). Através do RPN, identificou-se o modo de falha mais crítico e prioritário para tratativa.

Como Modos de falha principais, foram identificados:

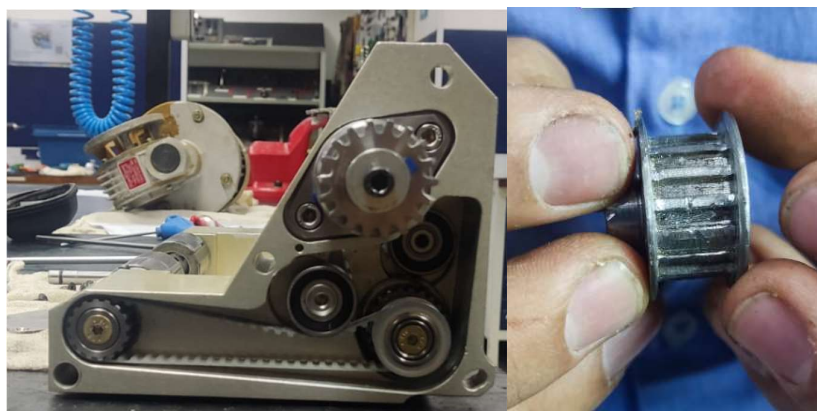
- Divergência entre Passo Frontal das polias e Correias;
- Geometria de flanges das polias dentadas;
- Tensionamento de Correias.

FMEA - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E EFEITOS

PUNTO DA FALHA		ANÁLISE DA FALHA				AVALIAÇÃO DE RISCO					
EQUIPAMENTO	FUNÇÃO DO EQUIPAMENTO	COMPONENTE	MODOS DE FALHA	EFEITO DA FALHA	CAUSA DA FALHA	OCORRÊNCIA	SEVERIDADE	DETECÇÃO	RPN		
FMEA: REDUÇÃO DE QUEBRAS CONJUNTO ROLAGEM		ÁREAS ENVOLVIDAS: Time de Aplicação da Manutenção, Time Técnico Linha Produção, Time técnico setor Subconjuntos, PCM		APROVAÇÃO DO CLIENTE:							
PROCESSO: ROLAGEM E PERFURAÇÃO DO CONJUNTO		PROJETO: REDUÇÃO DE QUEBRAS CONJUNTO ROLAGEM		DATA DO FMEA: 03/06/2022							
RESPONSÁVEL PROJETO: LUIS ANDRÉ		EQUIPE: Luis André, Gabriel Lopes, Adriano, Luiz Silva, Juliana, Robson, Sebastião, Roberto, Marcos Piva, Alberto, Sávio		DATA 1ª EMISSÃO: 21/06/2022							
				DATA REVISÃO:							
CONJUNTO DE ROLAGEM E PERFURAÇÃO	Fazer rolagem do produto no equipamento para posterior perfuração	Polias sincronizadas	Desgastes nos dentes	Quebra dos dentes da correia	Tensionamento da correia	3	10	10	300		
					Sujidade						
					Qualidade das polias (peça						
			Desgastes na flange	Desgaste lateral da correia /	Desalinhamento da correia	Folga entre o eixo e a polia	Fixação	3	10	10	300
							Oxidação				
							Tolerância dimensional				
		Desgaste na base (furo da polia)	Folga entre o eixo e a polia	Folga entre o eixo e a polia	Folga entre o eixo e a polia	Fixação	3	10	10	300	
						Oxidação					
						Tolerância dimensional					
		Desgaste no rasgo de chaveta	Folga entre o eixo e a polia	Desalinhamento dos rolos e	Tolerância dimensional	Fixação	3	10	10	300	
						Oxidação					
						Tolerância dimensional					
Correias	Quebra do dente	Embolamento no tambor do laser e desvio padrão da TIP	Embolamento de cigarro	Tensionamento	10	10	3	300			
				Folga de rolamento							
				Embolamento de cigarro							
Ruptura da correia	Perfuração ineficiente do cigarro	Polia com desgaste/confecionada	Desalinhamento na base do tensor da correia	Tensionamento	3	10	3	90			
				Folga de rolamento							
				Embolamento de cigarro							
Desgaste lateral	Problema na transferência do cigarro	Polia com desgaste/confecionada	Folga de rolamento	Folga no furo da polia	3	3	10	90			
				Folga de componentes							
				Polias e flanges desgastadas							
				Tensionamento							

Figura 9. Exemplo do FMEA.

No caso de polias sincronizadoras, através da ficha de falha digital, foram mapeados os conjuntos que mais sofreram quebras durante a produção e uma inspeção profunda de seus componentes foram realizadas. Ao realizar a inspeção das polias sincronizadoras, detectou-se variações construtivas e geométrica entre os conjuntos (Fig. 10a), e, em alguns casos, divergências geométricas e construtivas dentro do próprio conjunto (Fig. 10b).



(a)

(b)

Figura 10. Exemplos de falhas em polias sincronizadoras.

Algumas polias originais foram se deteriorando ao longo do seu ciclo de vida útil, e, por questões de demanda e tempo de reparo dos conjuntos, algumas polias foram confeccionadas e substituídas para atender à produção. Porém, três pontos principais foram identificados acerca destas polias confeccionadas:

1. O Passo frontal de algumas polias não estava condizente com o passo frontal dos dentes da correia original do conjunto. Desta maneira, as correias sofriam esforço excessivo durante o movimento, causando a falha no fundo dos dentes com posterior arrancamento de dentes e ineficiência no funcionamento do conjunto;

2. O material utilizado na confecção não possuía propriedades mecânicas ou tratamento superficial para garantir maior resistência ao desgaste superficial, desta maneira, identificou-se polias com dentes amassados e com desgastes em sua superfície;

3. Os flanges das polias dentadas, aos quais são responsáveis por garantir a correia sempre em posição e evitar deslocamentos axiais foram confeccionados em geometria diferente. As polias originais possuem flanges cônicos, responsáveis por auto-alinhar as correias sincronizadoras em caso de deslocamento, porém os flanges confeccionados tinham geometria reta, não realizando o auto-alinhamento e causando o deslocamento da correia para cima do flange. Isto favorecia o desgaste na superfície lateral da correia e como consequência o travamento do conjunto e perda de sincronismo.

Já no caso de correias sincronizadoras, foi identificado como modo de falha durante a execução do FMEA consistia no tensionamento das correias sincronizadoras. O processo de substituição e tensionamento era realizado de maneira qualitativa. Desta maneira, todo o processo estava diretamente ligado à experiência do colaborador técnico responsável pelo reparo. Não havia medidores de frequência compatíveis para a medição das correias na companhia e desta maneira o valor quantitativo de tensão não era conferido.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo desta pesquisa, a primeira fase centrou-se na análise bibliográfica, elucidando o panorama da indústria brasileira em relação à evolução mundial da manufatura. Pela literatura, foi possível perceber como a

manutenção autônoma e a cultura "zero perdas" têm sido instrumentais no alcance de excelentes resultados industriais globalmente.

Com base nessa fundamentação teórica apresentada na seção 2, a pesquisa avançou para a fase prática na segunda etapa. O desenvolvimento de uma ferramenta no *PowerApps*®, resguardada pelos direitos da empresa, mostrou-se vital para a coleta e análise de dados relevantes à confiabilidade da manutenção e para a geração de contramedidas dentro da organização.

4.1 PLANO DE AÇÃO E CONTRAMEDIDAS

Após a identificação dos principais modos de falha, iniciou-se então uma estruturação do plano de ação e contramedidas, visando a revitalização dos conjuntos, ajustes-padrão, definição de métricas, reavaliação de planos de manutenção e replicação.

Após a contextualização do cenário de falhas atual, o passo seguinte para a redução e eliminação de quebras foi o entendimento dos princípios de funcionamento e identificação dos tipos de componentes que determinam o pleno trabalho do conjunto. Utilizando-se de três ferramentas avançada de uso interno da companhia, voltadas à Manutenção Autônoma foram levantados os seguintes pontos:

- **Parafusos e Bases de Fixação:** Foram identificados e demarcados todos os parafusos responsáveis por garantirem a fixação, posicionamentos e ajustes do conjunto. Através da ferramenta 01, foram listadas as quantidades, especificações e dimensões de todos eles. Posteriormente, foram determinadas as colorações de cada parafuso, sendo em vermelho os parafusos que exigiam um único ajuste, sem necessidade de inspeções e reajustes; e parafusos em amarelo, aos quais seriam necessários a inspeção em alguma rotina preventiva para garantir ajustes e o bom funcionamento do conjunto

- **Princípio de Funcionamento e Ajustes Padrão:** uma vista explodida do conjunto foi analisada juntamente com o time técnico, identificando todo o seu princípio de funcionamento. Todos os ajustes e procedimentos padrão necessários foram analisados, conforme recomendações de manual e orientação do fabricante, e foram descritos na Ferramenta de Análise 02.

- **Levantamento de Planos de Inspeção, Lubrificação, Limpeza e**

Manutenção existentes: foram analisadas todas as rotinas existentes para o conjunto e as mesmas foram descritas na Ferramenta 02. Desta maneira, iniciou-se uma discussão acerca da efetividade dos planos atuais com relação à quantidades de quebras. Foram avaliados a periodicidade, quais componentes eram inspecionados e/ou substituídos, quais limpezas, lubrificações e ajustes eram contemplados nos planos e se ele possuía robustez de informações

• **Revisão e melhoria dos planos de manutenção e rotinas preventivas:**

Após a primeira crítica das rotinas preventivas já realizada, iniciou-se a criação da ferramenta de análise 03, ao qual foi responsável por descrever todos os componentes contemplados no conjunto, e os categorizando por subgrupos, sendo eles: Transmissão (correias, polias e engrenagens), Rolamentos, Vedações, Pneumática, Lubrificantes, Adesivos e Sensores. Após a categorização, foram comparados quais componentes não estavam contemplados nas rotinas levantadas pela ferramenta 02 e com isso todos os planos foram atualizados de forma a contemplar todos os processos de limpeza, lubrificação, ajustes, inspeções e trocas conforme a necessidade e modos de falha levantados.

• **Revisão de Estoque de consumo:** Após a definição de nova periodicidade dos planos de troca de seus respectivos componentes, foi realizado uma análise do consumo médio em almoxarifado e readequado o estoque mínimo de segurança para atender à toda a demanda preventiva. Foram considerados o consumo de componentes para onze conjuntos e o tempo de entrega dos itens ao almoxarifado. Todos os componentes originais têm origem na Alemanha, portanto considera-se um prazo médio de 45 dias mais quinze dias de desembaraços fiscais de importação.

Após a definição de todos os processos preventivos de maneira robusta, foram levantados quais conjuntos, através dos TAG's preenchidos na ficha de falha digital, que possuíam maior recorrência e impactos de quebras. Foi realizado um plano minucioso de inspeção e revitalização de todos os onze conjuntos, conforme priorização.

Feito todo este processo de revitalização, os planos de manutenção atualizados foram implementados e começaram a ser controlados de maneira efetiva, garantido a sua execução na periodicidade necessária e evitando-se *Backlogs* de execução.

Paralelo a este processo de revitalização, foi estruturado pelo time técnico um plano de treinamento de inspeção e execução de todos os planos de manutenção revisados. O treinamento foi realizado a todo o time do setor de manutenção e aos mecânicos e técnicos da linha de produção e instruído como todos os novos processos deveriam ser executados, bem como a sua importância para o bom funcionamento dos conjuntos. Instrumentos de medição e ferramentas, como frequencímetro e ferramentas de montagem de rolamentos, foram adquiridos, de maneira a atender as quantidades mínimas e toda a demanda da fábrica.

4.2 RESULTADOS PÓS-IMPLEMENTAÇÃO

Após a implementação dos processos completos, ocorridos entre Julho e Setembro de 2022, houve uma queda significativa do número de falhas e quebras do conjunto. Através do levantamento de dados das fichas de falhas, conseguiu-se identificar uma redução de aproximadamente 89,5 % do número de quebras do 2º trimestre para o 3º trimestre de 2023, quando comparado todos os conjuntos da fábrica, como mostra a Fig. 11.

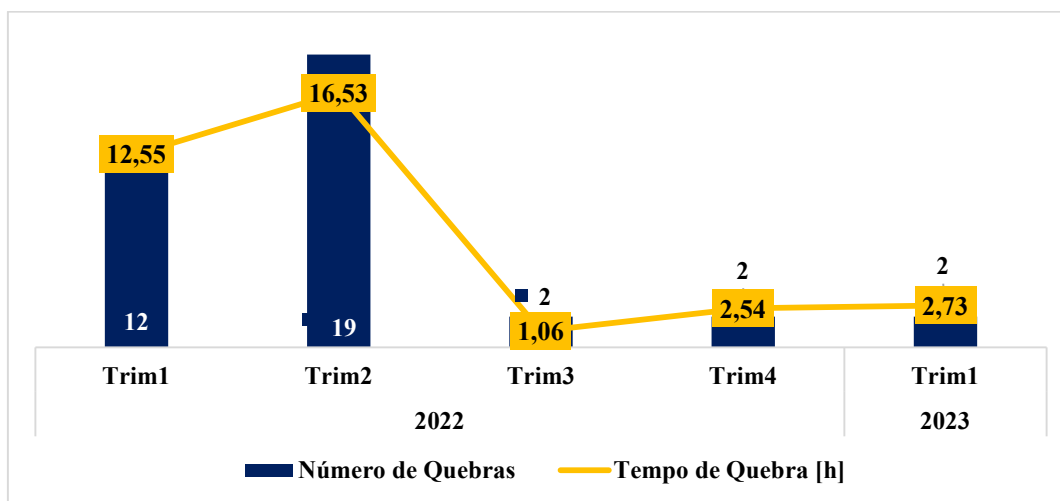


Figura 11. Relação entre número de quebra e tempo indisponível de máquina por cada trimestre.

Durante a execução dos planos de manutenção, pôde-se concluir que todos os componentes estavam em seu nível esperado de desgaste. As rotinas preventivas estavam de acordo com as necessidades produtivas, gerando uma

redução significativa no tempo de máquina indisponível e aumentando a produtividade da fábrica

Como resultado após a implementação das ações e contramedidas, conseguiu-se uma redução de 1365 minutos de *downtime* em decorrência de quebras, aumentando a produtividade da companhia em 9,55 milhões de produtos nos 6 meses subsequentes. Esse aumento de produção trouxe um lucro cessante produtivo de aproximadamente R\$ 3.523.000,00. Os custos com recuperações e trocas de componentes também tiveram uma redução de 84,6 %, totalizando uma redução de R\$ 226.861,00 nos custos de manutenção corretiva.

4.3 NOVA CONFIABILIDADE

Logo após a execução do plano de ação do FMEA construído e a implementação de suas contramedidas, conseguiu-se logo no primeiro trimestre subsequente, um avanço significativo nos resultados de confiabilidade.

Uma nova confiabilidade de 77,55 % foi atingida (Fig. 12), obtendo-se um ganho expressivo na redução de quebras e disponibilidade de máquina para produção. Através da ficha de falha digital, foi possível acompanhar de perto a evolução dos resultados, pois as informações de quebras tornaram-se documentadas em sua totalidade e em tempo real.

A assertividade nas tomadas de decisão aumentara e com isso conseguiu-se rastrear todas as áreas de máquina com menor confiabilidade e que requeriam maior atenção para manutenções corretivas e, principalmente para manutenções preventivas, pois a partir de dados digitais, foi possível rastrear a evolução de confiabilidade das áreas de máquina e comparar com as estratégias preventivas existentes, corrigindo-as conforme as necessidades da companhia.

Planos de manutenção subdimensionados foram identificados e reajustados, reduzindo-se o número de quebras globais da companhia, e planos de manutenção superdimensionados também foram reajustados, promovendo redução nos custos da companhia sem afetar a performance final do equipamento.

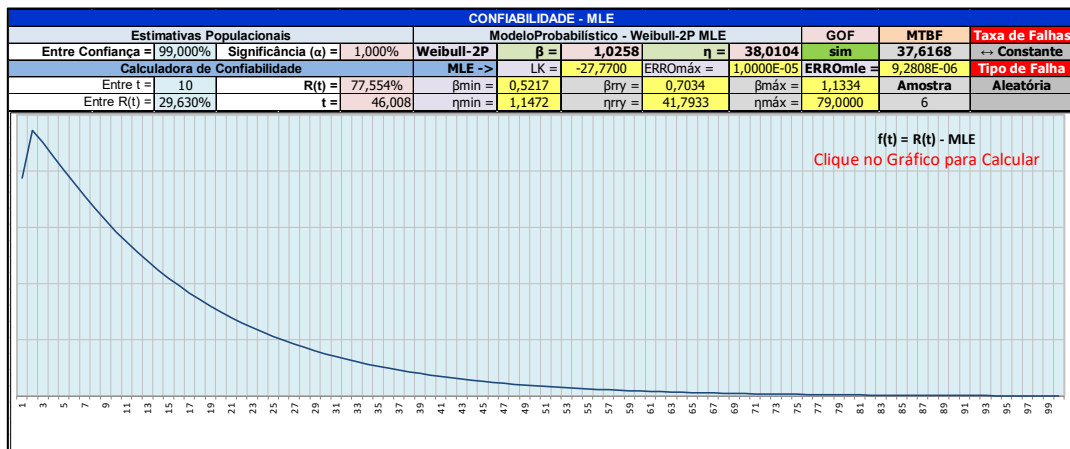


Figura 12. Tela de apresentação da confiabilidade final.

Os dados coletados evidenciaram que uma análise detalhada pôde reduzir a recorrência de falhas em 25 % durante um período específico, representando uma economia média de 1100 minutos de *downtime* neste mesmo período. Tal análise, auxiliada pela ferramenta desenvolvida, revelou a eficácia do FMEA na atualização dos planos de manutenção, minimizando riscos associados à falta de peças sobressalentes e realçando a prática de estoque "*just in time*", um pilar da Indústria 4.0.

Esta pesquisa também sublinhou a transição digital em andamento na indústria. Principalmente a partir da segunda metade da década de 2010, as equipes têm demonstrado uma inclinação para o registro de dados em plataformas digitais, evidenciando a crescente substituição dos registros manuais tradicionais por soluções mais ágeis e digitais.

Esta transição não apenas tem implicações técnicas, mas também psicológicas e organizacionais. A integração de tecnologias digitais no ambiente de trabalho pode afetar a motivação, a satisfação e o engajamento dos funcionários. Do ponto de vista da psicologia do trabalho, ferramentas digitais podem proporcionar uma sensação de modernidade e eficiência, mas também podem introduzir novas fontes de estresse, como a necessidade de aprender a usar novas tecnologias ou a sensação de estar constantemente conectado.

No âmbito da gestão de pessoas, a transição para o digital demanda uma abordagem mais holística, onde treinamentos contínuos e suporte são cruciais para assegurar que todos os colaboradores se sintam confortáveis e

competentes ao usar novas ferramentas. A gestão também deve estar atenta para garantir que o avanço tecnológico não amplie a distância entre diferentes gerações de trabalhadores, mas, pelo contrário, sirva como uma ponte de comunicação e colaboração.

Assim, enquanto as ferramentas digitais oferecem inúmeras vantagens em termos de eficiência e precisão, é essencial que as empresas também considerem os impactos humanos dessas mudanças e estabeleçam estratégias para garantir uma transição suave e inclusiva.

No entanto, a transição digital, como mencionado anteriormente, não traz apenas benefícios na eficiência dos processos, mas também impacta diretamente a retenção e acessibilidade da informação. Antes da digitalização, as informações poderiam se perder com movimentos e rotações de cargos, dificultando a análise contínua e o compartilhamento de conhecimento entre os colaboradores. A digitalização, portanto, não é apenas uma questão técnica, mas também se trata de garantir que as informações e aprendizados acumulados sejam preservados e utilizados de forma otimizada para impulsionar a melhoria contínua. Com a digitalização desse acervo de dados, as empresas não apenas impulsionam suas operações diárias, mas também cultivam uma cultura onde o conhecimento é acumulativo e as decisões são tomadas com uma visão completa do histórico operacional.

Movimentos e rotações nos cargos de trabalho são inerentes ao processo, e cada vez mais via-se a necessidade de garantir que todas as informações fossem resguardadas e que pudessem ser acessadas sempre que necessário. Com a implementação das ferramentas e bases de dados digitais, foi possível estabelecer um processo robusto, com informações disponíveis para tomadas de decisões rápidas e assertivas.

Notadamente foi percebido a redução de retrabalhos em processos de análise e implementações de ações no campo da manutenção, visto que, por falta de conhecimento ou de acesso aos dados anteriores, muitos colaboradores reiniciavam análises que remetiam a conclusões e resultados encontrados por outros colaboradores há tempos atrás.

Com isso, foi possível garantir a continuidade do processo, de modo a implementar o processo mais puro da melhoria contínua visando a cultura de “zero perdas”. Como exemplo, a tratativa de falhas do conjunto avaliado neste

trabalho foi conduzida de modo a entender todas as ações e contramedidas já implementadas anteriormente, avaliar os resultados anteriores já alcançados, otimizar ainda mais o processo e garantir que novos patamares fossem alcançados.

A partir da digitalização das informações, a companhia possui acessos em tempo real do cenário de todos os equipamentos, e através das análises de tendências, já é capaz de ser mais assertiva nas tomadas de decisões para, por exemplo, realizar um investimento mais robusto em alguma área de equipamento específica que trará resultados mais significativos para a companhia. Todo esse embasamento para tomadas de decisão tem proporcionado redução de custos por quebras ou investimentos ineficientes, tem proporcionado maior engajamento dos times para a resolução dos problemas e tem garantido o direcionamento para as tratativas conforme a correta priorização de ações para mitigação de falhas.

A partir deste novo conceito, já foi percebida uma redução significativa de 2,2 quebras por cada 100 milhões de produtos produzidos para 1,5 quebras nos últimos 6 meses. Desta maneira o *downtime* médio mensal vem sendo reduzido em aproximadamente 3500 min, proporcionando um aumento de produtividade de 24,5 milhões de produtos mensais. Tais dados levam em consideração os resultados globais da fábrica de todos os módulos de produção.

Com o mapeamento digital das bases de dados, iniciou-se também um trabalho de priorização para redução de quebras de componentes mais impactantes ao processo produtivo. Inicialmente foram detectadas oportunidades em 3 componentes, sendo eles: correias, rolamentos e sensores. Antes da digitalização da ficha de falha, as quebras estavam ocorrendo de maneira recorrente ou em grandes quantidades, e não eram traçados planos de priorização robustos e ágeis antes de serem compilados todos os dados manualmente. Isso representava, em um cenário real, um tempo médio de 3 a 5 meses para que se identificasse uma tendência de aumento e, assim, pudessem ser traçados planos de ação para redução de falhas e tempo de máquina indisponível.

Após a geração de dados em tempo real, essa análise pôde ser feita de maneira diária, obtendo-se dados relevantes para tomadas de decisão mais rápidas. Neste novo cenário, o tempo médio para identificação de tendências de

aumento reduziu para duas a quatro semanas, e as tratativas puderam ser direcionadas de forma mais assertivas.

Através dos gráficos das Fig. 13, 14 e 15 abaixo, é notada a implementação de processos de TPM e RCM para redução de falhas. À medida que estes componentes tiveram aumentos significativos de quebras, iniciaram-se imediatamente as análises profundas, com uso de ferramentas avançadas de manutenção autônoma para identificação das causas raízes e redução dos impactos. Todas as informações de ações e contramedidas puderam ser registradas e ficam disponíveis para acesso ao acervo histórico de falhas de todos os equipamentos. Como resultado, percebeu-se uma redução de quebras em 73,9 % para correias, 54,5 % para rolamentos e 75 % para sensores.

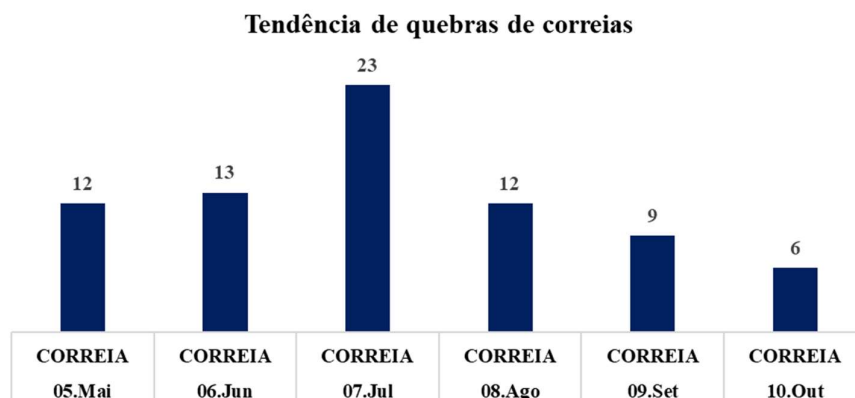


Figura 13. Tendência de quebras de correias.

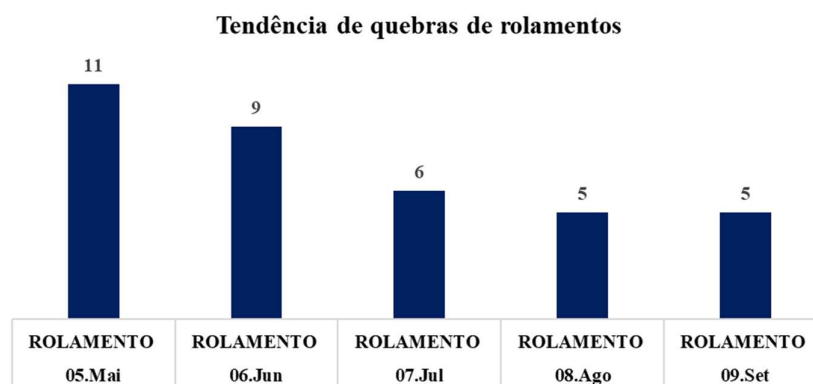


Figura 14. Tendência de quebras de rolamentos.

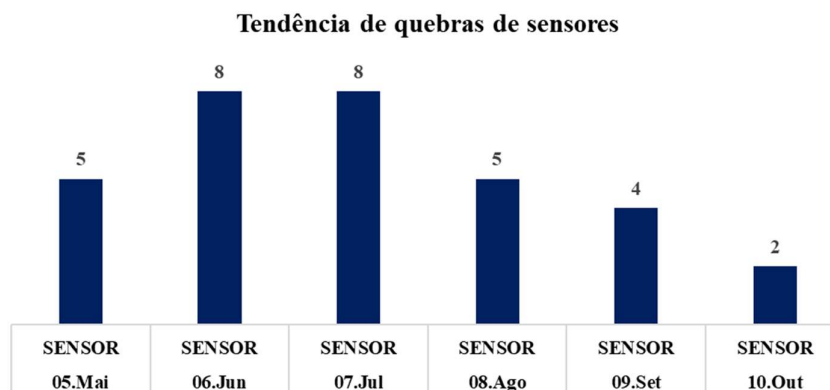


Figura 15. Tendência de quebras e sensores.

Esses resultados de quebras levam em consideração dados compilados de toda a fábrica, sendo ao todo 28 módulos de produção, e com produção média mensal de 5,1 bilhões de produtos. Desta maneira a medida de saída mais controlada para a saúde do processo são as quantidades de quebras e quantidade de quebras por cada 100 milhões de produtos.

4. CONCLUSÃO

À medida que a era da informação avança, a digitalização das falhas se consolida como um elemento crucial para organizações em busca de eficiência operacional. Este trabalho evidenciou como a coleta e armazenamento de dados de forma digital oferecem uma base sólida para a construção de relatórios analíticos e direcionados, especialmente quando se utiliza ferramentas como o *Power BI*®.

No contexto da MCC e da TPM, a digitalização das falhas é ainda mais relevante. A MCC, focada na otimização da confiabilidade dos ativos, se beneficia da capacidade de rapidamente identificar e categorizar falhas através de dados digitalizados, permitindo estratégias de manutenção mais precisas. Por sua vez, o TPM, que busca a eficiência total das operações, ganha com a visão unificada e digital das falhas, integrando equipes e fortalecendo a prevenção.

Dentro deste cenário de transformação digital, uma das maiores revoluções vem da implementação da ficha de falha digital. Ao digitalizar esse processo, não apenas facilitamos o registro e rastreamento de falhas, mas também geramos uma rica fonte de dados que pode ser analisada detalhadamente. A partir desses dados, a organização tem a capacidade de compreender melhor as nuances operacionais, identificar padrões e, conseqüentemente, desenvolver estratégias mais eficazes de manutenção e prevenção. Agora, apresentaremos imagens que sintetizam estas informações, oferecendo uma visualização prática da amplitude e profundidade dos *insights* que podem ser extraídas.

Uma das evidências mais contundentes deste estudo se revela na Fig. 16, onde observa-se que componentes como rolamentos e correias são os mais vulneráveis. Esse *dashboard* não apenas categoriza as falhas – desde condições básicas até falhas de montagem – mas também ilustra a eficiência de contramedidas adotadas e diferencia as falhas por origem, seja mecânica ou eletrônica. Em um contexto operacional mais amplo, esta *dashboard* traz *insights* sobre os turnos de trabalho, permitindo avaliações sobre práticas e condições específicas de cada turno.

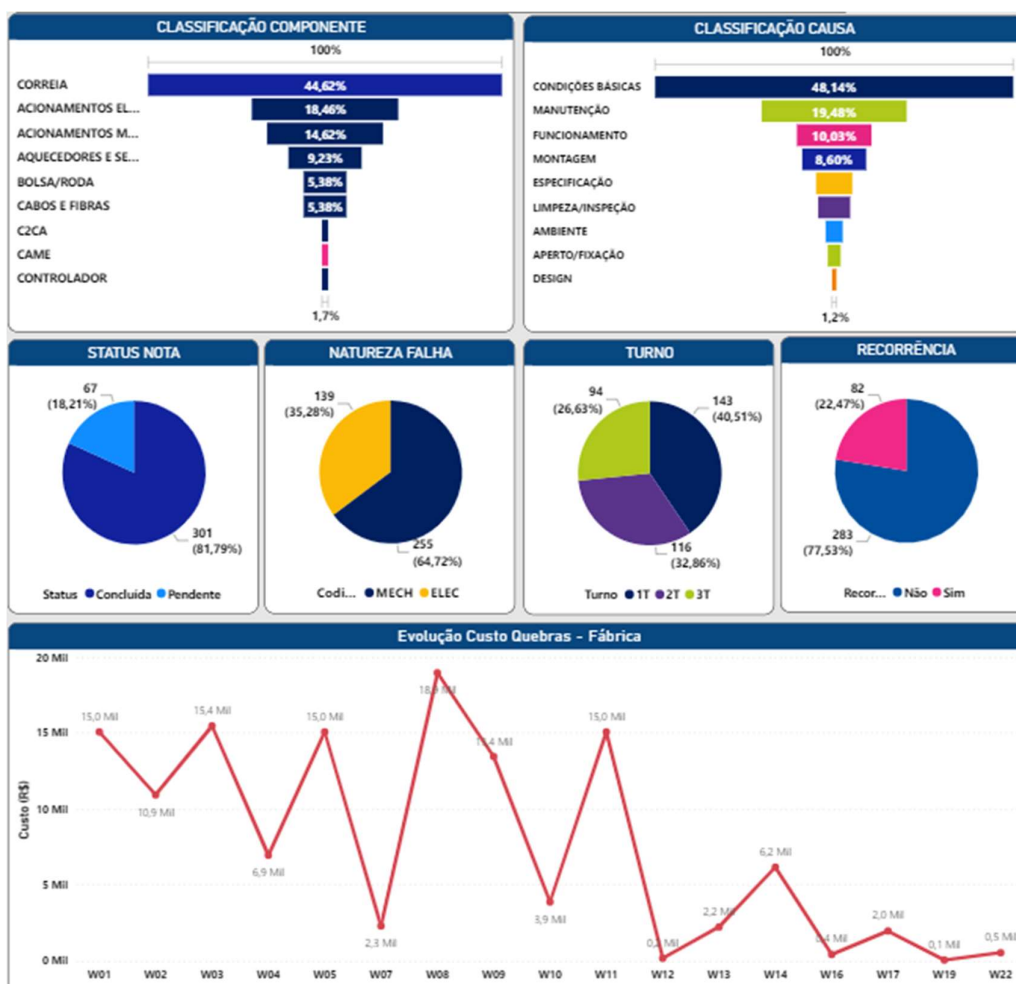


Figura 16. Dashboard de falhas.

A Fig. 17 demonstra as causas de falha mais recorrentes ao longo dos meses analisados. Esta perspectiva temporal revela tendências claras e indica se as falhas são devidas a condições básicas, manutenção ou questões operacionais.

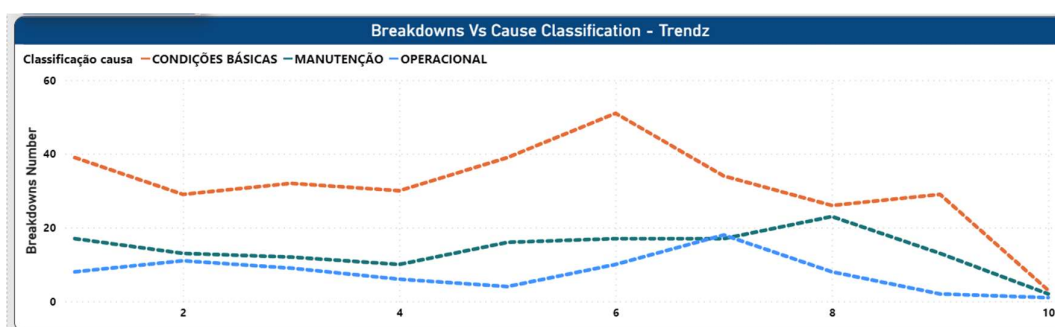


Figura 17. Breakdowns vs. Cause Classifications ao longo dos meses.

A Fig. 18 complementa a anterior, focando na recorrência das falhas mês a mês, tornando-se um instrumento chave para avaliar a eficácia das intervenções de manutenção e contramedidas aplicadas das quebras anteriores.

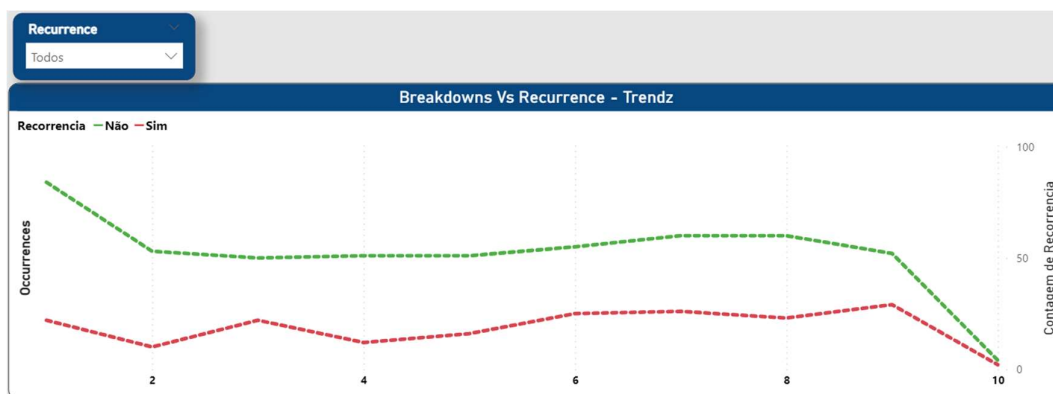


Figura 18. Breakdowns vs. Recurrence ao longo dos meses.

Por fim, a Fig. 19 mostra a tendência de confiabilidade mapeada ao longo das semanas, demonstrando se as práticas de manutenção estão garantindo a diminuição de quebras e/ou falhas no equipamento. Além do mais é mostrado o fator de forma de confiabilidade, bem como a influência sob a manutenção indicada para cada fase da curva da banheira.

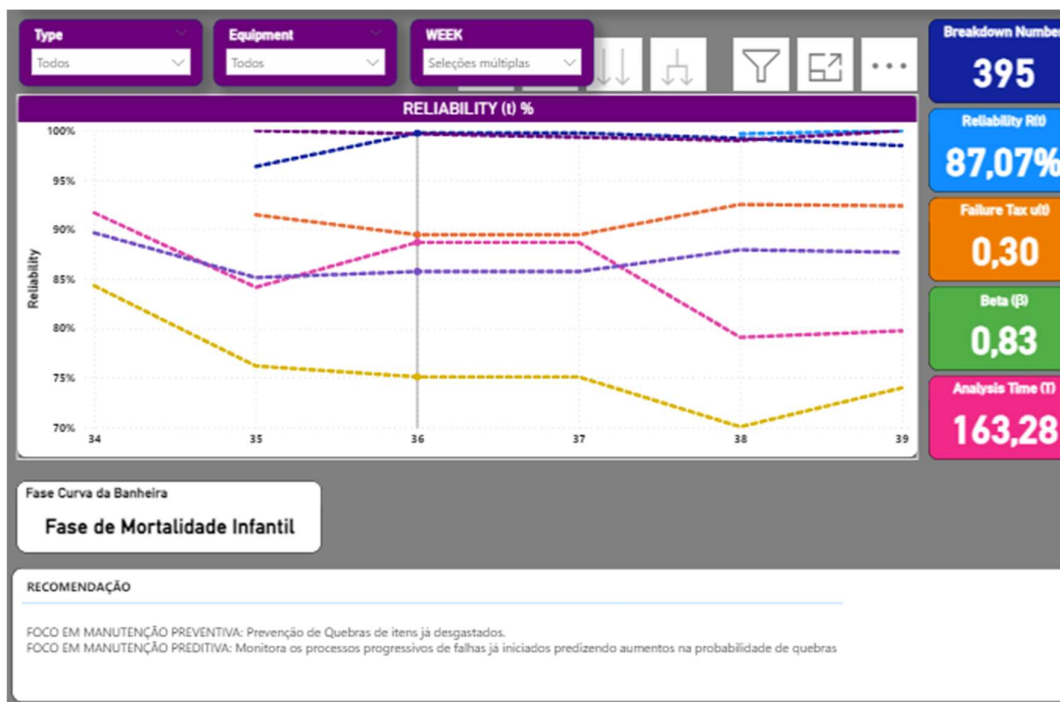


Figura 19. Dashboard de confiabilidade (%).

Estes relatórios não só simplificam informações complexas, mas também permitem visualizações intuitivas e interativas que proporcionam *insights* profundos. Em essência, esses relatórios atuam como bússolas, orientando os gestores em suas estratégias e ações diárias, permitindo que estes otimizem processos, reduzam custos e melhorem a eficiência.

Em suma, a digitalização, além de ser uma evolução tecnológica, representa uma revolução na forma como os gestores de manutenção visualizam, interpretam e reagem às informações. À luz das descobertas deste trabalho, fica evidente que a transformação digital, especialmente quando combinadas com ferramentas como o *Power Apps*© e *Power BI*©, é imperativa para indústrias que desejam manter-se ágeis, resilientes, competitivas e à frente de seus desafios na atual paisagem industrial.

5. REFERÊNCIAS

- A indústria 4.0 chegou no Brasil?. SENAI, 2019. Disponível em: <<https://www.sesirs.org.br/industria-inteligente/industria-40-chegou-no-brasil>>. Acesso em: 05 set. 2023
- Almeida, R.T.; Loos, M.J. Utilização da ferramenta Kaizen em uma indústria de alimentos e seus ganhos. GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, v. 15, n. 1, p. 23–41,2020.
- Branco Filho, G. A organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2008
- Cudney, E. A., Furterer, S. L., & Dietrich, D. (2010). TPM implementation in a food processing plant. *Engineering Management Journal*, 22(3), 52-60.
- Dekker, S. W. A. (1999). *Field Guide to Human Error Investigations*. CRC Press.
- Fogliato, F. S., Ribeiro, J. L. S. (2011). *Confiabilidade e manutenção industrial*. Editora Elsevier
- Fraga, L. G., Pinto, E. R. Processo de Weibull Poisson para Modelagem da confiabilidade em Sistemas Reparáveis. *Revista Matemática e Estatística em Foco*. Uberlândia, set. 2013
- Hompel, M. T.; Kerner, S. Logistik 4.0: Die Vision vom Internet der autonomen Dinge. *Informatik-Spektrum*, v. 38, n. 3, p. 176–182, 2015
- Junior, M. A. C. Modelo de confiabilidade para sistemas reparáveis considerando diferentes condições de manutenção preventiva imperfeita. 2016. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- Lasi, H.; Fettke, P.; Kemper, H.-G.; Feld, T.; Hoffmann, M. *Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering*. Springer, v.6, n.4, 2014.
- Liker, J.K. (2004) *The Toyota Way, 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. McGraw-Hill, New York.
- Longaray, A. A. et al.(2017) 'Applying the PDCA Cycle for Continuous improvement in a bovine confinement system: a case study', *Systems*, 12(3), p. 353.
- Machado, L. A. *Revoluções industriais: do vapor à internet das coisas*. 2016. Disponível em: <<http://www.cofecon.gov.br/2016/10/13/revolucoes-industriais-do-vapor-a-internet-das-coisas/>>. Acesso em: 28 set. 2023.

- Makhitek. Máquinas e Manutenção Industrial, 2018. INDÚSTRIA 4.0 - Você está preparado? Disponível em: <<http://makhitek.com.br/industria-4-0/>>. Acesso em 11 out. 2023
- Mattar, F. N. Pesquisa de marketing. 3.ed. São Paulo: Atlas, 2001.
- Mobley, R. K. (2002). An Introduction to Predictive Maintenance. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Moubray, J. Reliability-centered maintenance: second edition. 2ª. ed. New York: Industrial Press Inc., 1997
- Nakajima, S. (1988). Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. Productivity Press.
- O que é quarta revolução industrial? In: Salesforce. San Francisco, c2016. Disponível em: <https://www.salesforce.com/br/blog/2018/Janeiro/O-que-e-QuartaRevolucao-Industrial.html>. Acesso em: 20 set. 2023
- Rubmann, R. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. In: The Boston Consulting Group (BCG). Boston, 2015.
- Sankhya. O que é indústria 4.0 e qual seu impacto no mundo. 2021. Elabora por Redatora Sankhya. Disponível em: <https://www.sankhya.com.br/blog/industria-4-0/>. Acesso em: 09 out. 2023.
- Silva, L. G. Revolução Industrial 4.0 na engenharia de alimentos: estudo de caso na produção de muçarela. 2022. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.
- SEBRAE (2019). Inovação e Tecnologia: internet das coisas. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/>>. Acesso em 10 de out. 2023.
- Schwab, K. (2016). The Fourth Industrial Revolution. World Economic Forum.
- Seleme, R. Manutenção industrial: Mantendo a fábrica em funcionamento. Curitiba: Intersaberes, 2015.
- Smith, A. M. (1993). Reliability-Centered Maintenance. McGraw-Hill.
- Sousa, E. M. Engenharia de manutenção aplicada no dimensionamento da lubrificação de máquinas utilizadas por indústrias alimentícias de nutrição animal. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), Centro Universitário do Sul de Minas, Minas Gerais, Brasil. 77p. 2019.

- Suzuki, T. (1994). TPM in process industries. Productivity Press.
- Teles, J. (2019). A Bíblia do RCM: O Guia completo e definitivo da manutenção centrada em confiabilidade na indústria 4.0. Brasília: ENGETELES Editora
- Triviños, A. N. S. Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação. São Paulo: Atlas, 1987.
- WEF. Impact of the Fourth Industrial Revolution on Supply Chains. Genebra, Suíça: WEF, 2017.
- Wireman, T. (2004). Developing performance indicators for managing maintenance. Industrial Press.