

UNIVERSIDADE DE ARARAQUARA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Timóteo Simão Ferreira

**ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO EM USINA DE AÇÚCAR E ETANOL
COM DUAS LINHAS DE MOAGEM POR MEIO DA ENGENHARIA DE
CONFIABILIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade de Araraquara – UNIARA – como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar
Orientador

Araraquara, SP – Brasil

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

F444e Ferreira, Timóteo Simão

Estratégia de manutenção em usina de açúcar e etanol com duas linhas de moagem por meio de engenharia de confiabilidade/Timóteo Simão Ferreira. Araraquara: Universidade de Araraquara, 2024.
86f.

Dissertação (Mestrado) - Mestrado Profissional em Engenharia de Produção – Universidade de Araraquara - UNIARA

Orientador: Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar

1. Confiabilidade. 2. Manutenção. 3. Gestão da manutenção. 4. Usina de açúcar e álcool. I. Título.

CDU 62-1

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERREIRA, T. S. ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO EM USINA DE AÇÚCAR E ETANOL COM DUAS LINHAS DE MOAGEM POR MEIO DA ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade de Araraquara, Araraquara-SP.

ATESTADO DE AUTORIA E CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Timóteo Simão Ferreira

TÍTULO DO TRABALHO: Estratégia de manutenção em usina de açúcar e etanol com duas linhas de moagem por meio da engenharia de confiabilidade

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2025

Conforme LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998, o autor declara ser integralmente responsável pelo conteúdo desta dissertação e concede a Universidade de Araraquara permissão para reproduzi-la, bem como emprestá-la ou ainda vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a sua autorização.



Timóteo Simão Ferreira

Universidade de Araraquara – UNIARA

Rua Carlos Gomes, 1217, Centro. CEP: 14801–340, Araraquara-SP

E-mail (do autor): tsferreira@uniara.edu.br



UNIVERSIDADE DE ARARAQUARA - UNIARA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade de Araraquara — UNIARA — para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

NOME DO AUTOR: TIMÓTEO SIMÃO FERREIRA

TÍTULO DO TRABALHO:

DISSERTAÇÃO INTITULADA *“ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO EM USINA DE AÇÚCAR E ETANOL COM DUAS LINHAS DE MOAGEM POR MEIO DA ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE.”*

Assinatura do(a) Examinador(a)

Conceito

(X) Aprovado () Reprovado

Prof(a). Dr(a). Jorge Alberto Achcar (orientador(a))
Universidade de Araraquara - UNIARA

(X) Aprovado () Reprovado

Prof(a). Dr(a). Fábio Ferraz Júnior
Universidade de Araraquara - UNIARA

(X) Aprovado () Reprovado

Prof(a). Dr(a). Walther Azzolini Júnior
Universidade de São Paulo - USP

Versão definitiva revisada pelo(a) orientador(a) em: 19/03/2025

Prof(a). Dr(a). Jorge Alberto Achcar (orientador(a))

Dedicatória

À Deus por tornar esse mestrado possível. Minha esposa Juliana pelo incentivo e ao meu filho Benjamin, minha grande motivação.

AGRADECIMENTOS

A empresa RAÍZEN pelo apoio financeiro e disponibilização dos dados operacionais, pois sem eles esse desafio não seria possível.

Aos professores Dr. Jorge Alberto Achcar (Orientador) e Dr. Fábio Ferraz, por todo o suporte e orientação nesta jornada.

Aos colegas do Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da UNIARA pela amizade, companheirismo e resenhas.

À minha família pelo apoio incondicional. Em especial, meus pais Aldovando e Celma que sempre me incentivaram, minha esposa Juliana que sempre está comigo nos desafios e meu filho Benjamin que possui TEA e é um exemplo de superação.

RESUMO

Este estudo busca analisar a estratégia de manutenção em uma usina de açúcar e etanol localizada no estado de São Paulo, Brasil, a partir de uma perspectiva de engenharia de confiabilidade. Para embasar as análises, foi realizado um extenso estudo de revisão bibliográfica sobre manutenção industrial, com foco nas melhores estratégias adotadas globalmente para aumentar a eficiência e a confiabilidade de processos produtivos. Para isso, a pesquisa, caracterizada como um estudo de caso, utilizou dados de MTTR (*Mean Time to Repair*) de duas linhas de processamento de cana. Foram aplicadas técnicas de modelagem estatística para avaliar os tempos de reparo de todas as falhas ocorridas nas moendas ao longo de um período específico. Os dados de tempos de reparo foram modelados tanto pela distribuição log-normal na escala original quanto pela distribuição normal para os dados transformados em logaritmo natural dos tempos de reparo. Embora a análise tenha mostrado que os tempos médios de reparo foram estatisticamente semelhantes entre as duas moendas, a investigação estatística revelou a influência de diversos fatores sobre a duração dos reparos, como setores mais impactantes, turnos de trabalho, período da safra e equipamentos específicos. Para as principais análises, foi considerado também, o MTBF (*Mean Time Between Fails*) para verificar a frequência dos maiores ofensores. Esses achados destacam pontos críticos da atual estratégia de manutenção da empresa, com implicações importantes para otimizar o desempenho da área de manutenção e melhorar a disponibilidade dos equipamentos. Este estudo oferece, ainda, *insights* que, aliados às melhores práticas identificadas na revisão bibliográfica, podem contribuir para o aumento da competitividade da empresa, identificando quais as melhores estratégias de manutenção que devem ser adotadas para promover uma operação mais eficiente e confiável.

Palavras-chave: Modelos de confiabilidade. Estratégia da manutenção. Análise estatística. Tempos de manutenção. Usina Sucroenergética. Etanol.

ABSTRACT

This study seeks to analyze the maintenance strategy in a sugar and alcohol plant located in the state of São Paulo, Brazil, from a reliability engineering perspective. To support the analyses, an extensive literature review study was carried out on industrial maintenance, focusing on the best strategies adopted globally to increase the efficiency and reliability of production processes. To this end, the research, characterized as a case study, used MTTR (Mean Time to Repair) data from two sugarcane processing lines. Statistical modeling techniques were applied to evaluate the repair times for all failures that occurred in the mills over a specific period. The repair time data were modeled both by the log-normal distribution on the original scale and by the normal distribution for the data transformed into the natural logarithm of repair times. Although the analysis showed that the mean repair times were statistically similar between the two mills, the statistical investigation revealed the influence of several factors on the duration of repairs, such as the most impactful sectors, work shifts, harvest period and specific equipment. For the main analyses, the MTBF (Mean Time Between Fails) was also considered to verify the frequency of the biggest offenders. These findings highlight critical points of the company's current maintenance strategy, with important implications for optimizing the performance of the maintenance area and improving equipment availability. This study also offers insights that, combined with the best practices identified in the literature review, can contribute to increasing the company's competitiveness, identifying the best maintenance strategies that should be adopted to promote more efficient and reliable operations.

Keywords: *Reliability models. Maintenance management. Statistical analysis. Maintenance times. Sugar and alcohol plant. Ethanol.*

Lista de Figuras

Figura 1 - Fluxograma do processo de produção de açúcar, etanol e energia.....	14
Figura 2 - Fluxograma da Metodologia.....	18
Figura 3 - Distribuição das publicações por ano dos 208 artigos relacionados à Manutenção 4.0, plataforma <i>Scopus</i>	22
Figura 4 - As quatro gerações da manutenção.....	23
Figura 5 - Método de manutenção planejada.....	25
Figura 6 - Pilares da TPM.	32
Figura 7 - Gráfico mostrando a curva básica de confiabilidade (linha cheia).....	36
Figura 8 - Tipos de Curva.....	38
Figura 9 - Relação entre as fases do ciclo de vida da curva da banheira e estratégias de manutenção.....	38
Figura 10 – Triagem das Referências Bibliográficas.	47
Figura 11 - Histogramas dos tempos de reparo na escala original e gráficos de probabilidade normal para os logaritmos dos tempos de reparo (moedas A e B).....	54
Figura 12 - Avaliação dos modelos de probabilidade estudados.	57
Figura 13 - Gráficos de probabilidade log-normal e gráficos das funções de confiabilidade $R(t)$ associados com as duas moedas.	57
Figura 14 - Função Acumulada Média para cada “causa”.	59
Figura 15 - Gráficos de probabilidade log-normal associados aos níveis do fator causa e gráficos de confiabilidade $R(t)$ em cada nível do fator causa	60
Figura 16 - Box-plots e intervalos de confiança 95% de Tukey para as diferenças de medias (meses).....	63
Figura 17 - Box-plots e intervalos de confiança 95% de Tukey para as diferenças de medias (meses).....	67
Figura 18 - Função Acumulada Média para cada “causa”.	68
Figura 19 - Intervalos de confiança 95% de Tukey para as diferenças de medias (turnos) e gráficos dos resíduos.	69
Figura 20 - Box-plots e intervalos de confiança 95% de Fisher para as diferenças de medias (meses).....	71
Figura 21 - Probabilidades estimadas para $R(t) = P(T > t)$ com diferentes valores para t.	73

Figura 22 - Padrão de manutenção encontrado para cada moenda..... 76

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Estatísticas descritivas (Moenda (A) e Moenda (B))	55
Tabela 2 - EMV para os parâmetros da distribuição log-normal (duas moendas)	56
Tabela 3 - Estatísticas descritivas associadas aos níveis do fator causa.....	58
Tabela 4 - EMV para os parâmetros da distribuição log-normal (fator causa)	60
Tabela 5 - Estatísticas descritivas associadas aos turnos.....	61
Tabela 6 - Estatísticas descritivas associadas aos meses	61
Tabela 7 - Estatísticas descritivas associadas aos níveis de grupo	64
Tabela 8 - EMV para as médias dos tempos de reparos μT associadas aos níveis de grupo ...	64
Tabela 9 - Estatísticas descritivas associadas aos níveis do fator causa.....	65
Tabela 10 - EMV para os parâmetros da distribuição log-normal (fator causa)	66
Tabela 11 - Estatísticas descritivas associadas aos turnos.....	68
Tabela 12 - Estatísticas descritivas associadas aos meses	70
Tabela 13 - Estatísticas descritivas associadas aos níveis de grupo	72
Tabela 14 - EMV para as médias dos tempos de reparos μT associadas aos níveis de grupo .	72

Lista de Abreviaturas e Siglas

AHP - Analytical Hierarchy Process

ANOVA - Análise de Variância

BDTD - Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações

CAPES - Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CIBOCOF - Center for Industrial Management Maintenance Concept Development Framework

DOAJ - Directory of Open Access Journals

ELET - Manutenção Elétrica

EMV - Estimadores de Máxima Verossimilhança

EXCM - Excesso de Capacidade de Moagem

EXTR- Extração e Moagem

FABR - Fábrica de Açúcar

GVAP - Geração de Vapor

INST - Instrumentação

MASP - Metodologia de Análise de Solução de Problemas

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

MECN - Manutenção Mecânica

MW – MegaWatt

MTBF - Mean Time Between Failures

MTTR - Mean Time To Repair

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

OEE - Overall Equipment Effectiveness

PSO - Particle Swarm Optimization

RAMS - Reliability, Availability, Maintainability and Safety

RCM – Reliability Centered Maintenance

RRCM - Reliability and Risk Centered Maintenance

SAGe - Sistema de Apoio à Gestão do Fomento

SBU - Sistema de Bibliotecas da Unicamp

SIBi - Sistema Integrado de Bibliotecas

SciELO - Scientific Electronic Library Online

TPM - Total Productive Maintenance

Unesp - Universidade Estadual Paulista

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar

Unicamp - Universidade Estadual de Campinas

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização	13
1.2 Problemática	15
1.3 Questão da pesquisa	15
1.4 Objetivos.....	15
1.5 Objetivo principal.....	16
1.6 Justificativa.....	16
1.7 Aspectos metodológicos	18
1.8 Estrutura do trabalho	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Fundamentos da Manutenção Industrial.....	20
2.1.1 Tipos de Manutenção.....	24
2.1.1.1 Manutenção Corretiva	25
2.1.1.2 Manutenção Preventiva	27
2.1.1.3 Manutenção Preditiva.....	28
2.1.1.4 Manutenção por melhorias	29
2.1.1.5 Manutenção Produtiva Total	30
2.1.2 Engenharia de Confiabilidade	34
2.2 Conceitos da análise estatística de confiabilidade.....	40
2.2.1 Distribuição Exponencial	42
2.2.2 Distribuição de Weibull.....	43
2.2.3 Distribuição Log-normal	44
2.2.4 Distribuição Gamma.....	45
2.2.5 O Método de Máxima Verossimilhança.....	45
2.3 Estudo da confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade na manutenção industrial	46
3 METODOLOGIA.....	50
3.1 Método científico.....	50
3.2 Tipos de pesquisa	50
3.3 Procedimentos operacionais	51
4 RESULTADOS	53

4.1 Modelagem estatística da confiabilidade.....	53
4.1.1 Caracterização da Empresa.....	53
4.2 ANOVA.....	55
4.2.1 Definição da amostra.....	55
4.2.2 Tempos de manutenção da Moenda A	58
4.2.3 Tempos de manutenção da Moenda B.....	65
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

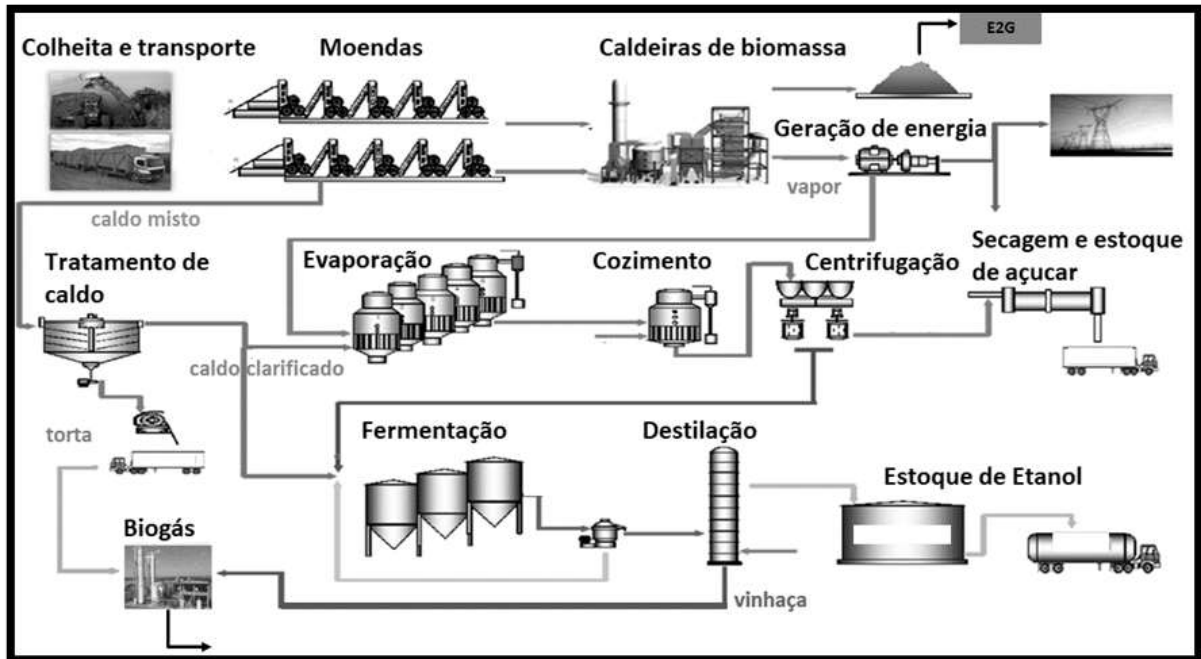
1.1 Contextualização

O Brasil ocupa uma posição de destaque na economia mundial, sendo reconhecido pelo seu papel fundamental no processo produtivo da cana-de-açúcar, utilizado nas usinas sucroalcooleiras. Tanto na produção de açúcar quanto de etanol, a cana-de-açúcar é a matéria-prima essencial. As usinas brasileiras desempenham um papel de relevância singular na economia do país, representando o complexo sucroenergético, que figura como o quarto setor mais influente da economia nacional.

O Brasil se destaca como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Na safra 2021/2022, conforme relatado pela UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2023), o Brasil atingiu uma impressionante produção de 523 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Essa substancial quantidade de matéria-prima foi destinada à fabricação de 32,06 milhões de toneladas de açúcar, além da notável produção de 27,55 bilhões de litros de etanol.

O processo produtivo nas usinas sucroalcooleiras inicia-se com a colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Nesse processo, a cana é separada da palha e, em seguida, é picada e transportada por caminhões. Em linha com Tonon Filho (2013), nas usinas, a cana passa pelo processo de moagem e sulfitação, sendo que o caldo mais rico em sacarose é direcionado à produção de açúcar, enquanto as moagens subsequentes são destinadas à fermentação para a obtenção de etanol. As usinas adotam um conceito de economia circular, aproveitando todas as partes da cana, inclusive o bagaço, que é utilizado como fonte de geração de energia elétrica (LIMA, 2011). Além disso, é possível a produção de energia elétrica a partir da produção do biogás que utiliza biodigestores de vinhaça e torta que são resíduos da produção (SALOMON; LORA, 2005) e também a produção adicional do Etanol de segunda geração, que é produzido utilizando-se o bagaço da cana-de-açúcar (BUCKERIDGE; GRANDIS; TAVARES, 2019). O processo descrito, pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do processo de produção de açúcar, etanol e energia.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Nesse contexto, o setor da indústria sucroalcooleira desempenha um papel crucial na economia brasileira, contribuindo significativamente para a produção de açúcar, etanol e energia elétrica. A otimização desse processo de produção é de grande importância para garantir a competitividade e a eficiência desse setor estratégico. Esta dissertação se propõe a explorar os desafios relacionados à manutenção nesse contexto, com o objetivo de melhorar a confiabilidade e reduzir os tempos médio de reparo dos equipamentos utilizados nas usinas de produção.

A globalização e os avanços tecnológicos intensificaram a competitividade entre empresas, tornando a gestão estratégica de manutenção essencial para garantir a confiabilidade e disponibilidade dos ativos. Segundo Fraser, Hvolby e Tseng, (2015), A manutenção, que antes era vista apenas como um centro de custos, agora é reconhecida como uma atividade estratégica crucial, com foco em preservar a funcionalidade dos equipamentos e otimizar a produção. No Brasil, médias e grandes empresas têm adotado programas de melhoria contínua, buscando integrar a manutenção às decisões estratégicas e financeiras das organizações.

A gestão de manutenção envolve ferramentas como Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade, que asseguram a operação eficiente dos equipamentos ao longo de seu ciclo de vida. Segundo Baran *et al.* (2014) a escolha do tipo de manutenção é vital para manter a performance dos ativos e, conseqüentemente, a produtividade da empresa.

1.2 Problemática

As atividades de manutenção têm evoluído significativamente, uma vez que englobam uma variedade de equipamentos que vão além dos simplesmente mecânicos, incluindo componentes eletrônicos, hidráulicos, eletromecânicos, de software e até mesmo aspectos humanos (ALSYOUF, 2009). Uma gestão inadequada da manutenção em instalações industriais pode resultar em reparos de longa duração, acarretando grandes perdas financeiras para as empresas (VISHNU; REGIKUMAR, 2016).

O objetivo primordial da manutenção em uma planta industrial é minimizar o tempo de inatividade e manter os equipamentos em condições operacionais com o menor custo possível (VISHNU; REGIKUMAR, 2016). Diversos métodos de manutenção têm sido desenvolvidos para atingir esse objetivo, incluindo a manutenção corretiva, preventiva, preditiva, manutenção produtiva total (TPM) e manutenção centrada na confiabilidade (RCM), conforme discutido por Mobley (2002). Uma estratégia eficiente de manutenção muitas vezes envolve uma combinação adequada desses métodos (FARRERRO *et al.*, 2002), com a RCM (Manutenção Centrada na Confiabilidade) sendo um programa que integra técnicas de engenharia de manutenção com uma abordagem sistemática (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; MOUBRAY, 1997).

No contexto das indústrias sucroalcooleiras no Brasil, a manutenção corretiva planejada muitas vezes prevalece devido às características sazonais de sua operação, especialmente durante a entressafra, que se estende por aproximadamente 4 meses. No entanto, a melhoria da estratégia de manutenção é fundamental para otimizar o desempenho e a confiabilidade dessas indústrias (MENGUE; SELLITTO, 2013; RAPOSO, 2011).

1.3 Questão da pesquisa

Com base nas informações contidas na seção 1.1 e 1.2, como os métodos estatísticos associados a manutenção podem contribuir na sugestão de melhorias e estratégias de gestão em uma usina de açúcar e etanol maximizando a disponibilidade dos ativos?

1.4 Objetivos

Este estudo visa desenvolver um modelo estatístico de confiabilidade para servir de subsídio nas análises técnicas de manutenção e otimizar a disponibilidade das moendas,

contribuindo para o aumento da produtividade e estabilidade no fornecimento de matéria-prima (cana-de-açúcar) para as usinas de produção.

Esta dissertação busca fornecer insights para aprimorar as estratégias de manutenção em usinas de processamento de cana-de-açúcar, contribuindo para a maximização da disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos durante as operações críticas de produção.

1.5 Objetivo principal

O objetivo principal deste estudo é verificar se a estratégia de manutenção atual de uma usina de grande porte, que possui duas linhas de moagem que produz açúcar, etanol e energia elétrica possui oportunidades de melhoria. Além disso, este trabalho tem objetivos específicos, que incluem analisar os tempos de reparo e, com base nos resultados obtidos, recomendar aos gestores da empresa a estratégia de manutenção mais eficaz a ser adotada.

Para atingir esse objetivo, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Conceituar e apresentar as formas de manutenção;
2. Apurar os dados históricos de reparos;
3. Desenvolver um modelo de análise de confiabilidade;
4. Com base no modelo proposto, avaliar os resultados;
5. Propor melhorias na estratégia de manutenção.

1.6 Justificativa

A formulação de estratégias de manutenção desempenha um papel crucial na operação eficaz de instalações industriais. Geralmente, essas estratégias são desenvolvidas com base em critérios subjetivos, onde equipamentos críticos são submetidos a manutenção preventiva, equipamentos ociosos são atendidos com manutenção emergencial e equipamentos redundantes seguem a política de manutenção corretiva (SELLITTO, 2005). A implementação de uma política de manutenção eficaz é fundamental para melhorar a competitividade de uma empresa no mercado (ALSYOUF, 2009; WAEYENBERGH; PINTELON, 2009).

No contexto de uma usina de processamento de cana-de-açúcar, como a foco deste estudo, a política de manutenção tradicionalmente se divide em dois períodos distintos: colheita e entressafra. Durante o período de colheita, que se estende de abril a novembro, a usina opera continuamente, com reparos mensais de 6 horas alternando entre as duas moendas, além de

manutenções planejadas. Nesse período, também são coletados dados e demandas que servirão de base para planejar as manutenções futuras.

Já na entressafra, que ocorre de dezembro a março, a usina interrompe completamente suas operações devido ao término da colheita da cana-de-açúcar. Nesse período, a instalação fica disponível para manutenção de acordo com o planejamento e orçamento previamente estabelecidos durante a safra.

Pode-se associar a confiabilidade à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). O estudo da confiabilidade de equipamentos auxilia na descoberta das prováveis causas que geram danos através das análises quantitativas dos dados (NAKAGAWA, 2005). Para alcançar esse propósito, são aplicadas análises estatísticas aos dados de duração de reparos, seguindo a abordagem de estudos previamente apresentados na literatura (SELLITTO, 2005; MENGUE; SELLITTO, 2013; KOMNINAKIS, 2017; KOMNINAKIS; PIRATELLI; ACHCAR, 2018). O intuito é identificar possíveis áreas de melhoria que possam contribuir para a redução dos tempos de reparo dos equipamentos, otimizando assim a eficiência da usina e fortalecendo sua competitividade no mercado. Assim como Komninakis (2017) avaliou a eficácia da estratégia de manutenção de uma indústria alimentícia utilizando Modelagem Estatística Aplicada Ao Tempo Médio de Reparo (MTTR) e ao Tempo Médio entre Falhas (MTBF) de uma linha de produção composta por seis máquinas de embalagem onde os dados coletados foram modelados usando distribuições de probabilidade Log-normal e Weibull, permitindo uma análise detalhada do desempenho das máquinas e da eficiência das práticas de manutenção adotadas,

A relevância deste trabalho justifica-se pela importância para os gestores, que precisam enfrentar desafios na busca por maximizar a disponibilidade dos equipamentos. Nesse sentido, é fundamental enxergar a manutenção como estratégia e identificar quais tipos de manutenção proporcionam os melhores resultados. Dessa forma, o estudo contribui diretamente para o alcance dos objetivos organizacionais.

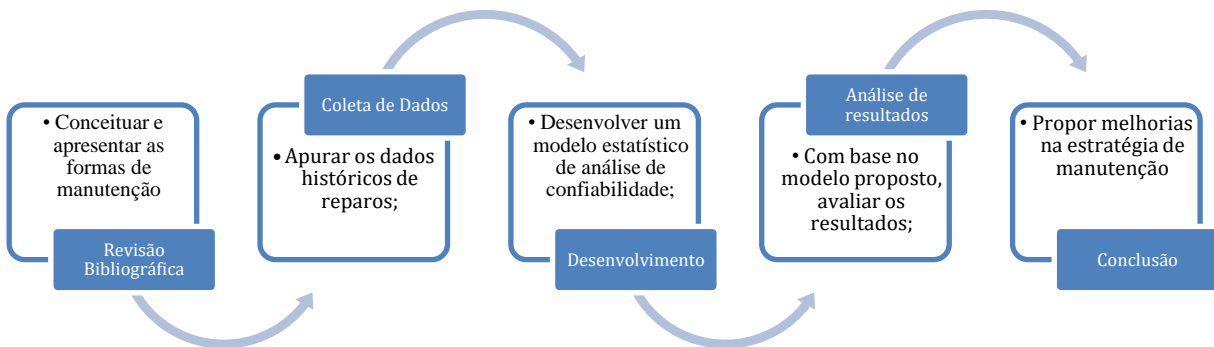
Para o meio acadêmico, o estudo fornece uma aplicação bastante importante de modelos de confiabilidade para a manutenção industrial. Existem excelentes trabalhos mencionados nas referências bibliográficas sobre este tema, porém aqui será apresentada uma abordagem interessante para o setor sucroalcooleiro.

1.7 Aspectos metodológicos

Esta dissertação, de natureza aplicada e abordagem quantitativa e qualitativa, emprega a modelagem estatística para analisar os tempos médio de reparo de duas moendas durante um período de 2019 a 2023. Vários fatores, como turnos, causas de reparos, meses e anos, podem influenciar os tempos médio de reparo dos equipamentos de produção. A identificação desses fatores é essencial para aprimorar a estratégia de manutenção na indústria (MENGUE; SELLITTO, 2013; RAPOSO, 2011).

Para Berto e Nakano (2014), uma pesquisa descritiva visa detalhar fenômenos ou situações por meio de observações minuciosas e análise de detalhes, com o objetivo de delinear um perfil preciso. Assim, este trabalho utilizará uma abordagem descritiva, cujo propósito é desenvolver um modelo estatístico que descreva as falhas nos equipamentos e estabeleça um perfil detalhado de suas características. A análise será realizada com base nas informações armazenadas no banco de dados da própria empresa, permitindo uma compreensão aprofundada e sistemática das falhas recorrentes e de suas particularidades específicas (Figura 2).

Figura 2 - Fluxograma da Metodologia.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A coleta de dados será efetuada através da extração de informações sobre interrupções para reparos disponíveis no sistema de gestão da empresa e em seu banco de dados. A abordagem adotada é de cunho quantitativo, e o método empregado consiste na modelagem estatística.

A abordagem quantitativa deve ser utilizada em investigações que visam descrever fenômenos explícitos e mensuráveis, baseando-se no número de ocorrências. Essa abordagem emprega habilidades matemáticas para desenvolver modelos que descrevem e representam o

funcionamento de um sistema ou parte dele (BERTO; NAKANO, 2014). Segundo Miguel (2007), a modelagem utiliza técnicas matemáticas e estatísticas para elaborar modelos que ajudam a compreender o ambiente, identificar problemas e definir estratégias para a tomada de decisões. Por outro lado, a pesquisa qualitativa foca na interpretação dos fenômenos e na atribuição de significados, sem necessitar de métodos estatísticos.

As abordagens quantitativas podem se valer de dados quantitativos, enquanto as qualitativas também podem usar esses dados para auxiliar na interpretação do pesquisador, ampliando as opções de análise e interpretação (BERTO; NAKANO, 2014).

Neste trabalho, será utilizada uma abordagem tanto quantitativa quanto qualitativa. A abordagem quantitativa será empregada devido ao uso de técnicas estatísticas, enquanto a qualitativa oferecerá suporte para a interpretação dos resultados sob a ótica dos conceitos da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC). O método adotado é a modelagem estatística dos dados, com a estimativa da confiabilidade dos equipamentos baseada nos tempos de reparo (MTTR) dos equipamentos de uma indústria.

A análise estatística será realizada utilizando o *software* Minitab® versão 2016. Na modelagem dos dados, serão assumidas as distribuições de Weibull e log-normal. Além disso, será conduzida uma análise descritiva preliminar dos dados, utilizando medidas descritivas usuais como médias, variâncias amostrais, modelos de ANOVA, gráficos de Tukey e boxplots como ferramentas estatísticas adicionais. Essa combinação de métodos permite uma compreensão mais abrangente e detalhada dos dados, facilitando a identificação de padrões e a interpretação dos resultados.

Os dados coletados para a análise estatística consistem em 1.410 registros de falhas de duas moendas (697 tempos de reparos para moenda A e 713 tempos de reparos para moenda B) entre 2019 até 2023. Esses registros contêm os tempos de duração de reparos em minutos.

1.8 Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho contempla o referencial teórico onde os conceitos estarão divididos da seguinte maneira: estratégia, manutenção e suas formas de classificação como: preditiva, preventiva e corretiva; as causas de indisponibilidades de equipamentos na indústria sucroalcooleira; posteriormente é apresentada a metodologia que será utilizada no desenvolvimento do trabalho; logo após a apresentação e análise dos dados obtidos, proposta de melhorias e por fim as considerações finais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fundamentos da Manutenção Industrial

A manutenção desempenha um papel crucial na preservação e recuperação da funcionalidade dos equipamentos industriais. Mesmo com o avanço tecnológico que trouxe inúmeras inovações, falhas ainda ocorrem em algum momento da vida útil desses equipamentos (SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007). Um plano de manutenção é composto por todas as tarefas que visam detectar, prevenir e corrigir modos de falha, executadas em uma periodicidade definida. Esse plano deve ser elaborado considerando os efeitos das falhas e conter ações aplicáveis e economicamente viáveis (TATSCH, 2010).

Conforme a NBR 5462-1994, um defeito é uma alteração ou desvio de uma característica em relação aos seus requisitos, que pode ou não ser determinado. Esse defeito pode afetar ou não a capacidade de um item desempenhar sua função requerida. A falha, por sua vez, é a incapacidade de um item continuar desempenhando sua função requerida, resultando na indisponibilidade do equipamento devido a uma atuação automática de proteção ou desligamento emergencial (SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007). Tatsch (2010) define falha funcional como a incapacidade de um item executar uma função específica dentro de limites pré-estabelecidos, também conhecida como estado de falha. Já a falha potencial é uma condição detectável e mensurável que indica uma falha funcional iminente ou em processo de ocorrência, podendo se manifestar como um defeito (TATSCH, 2010). Pane é o estado de um item em falha, resultado de uma falha (NBR 5462-1994).

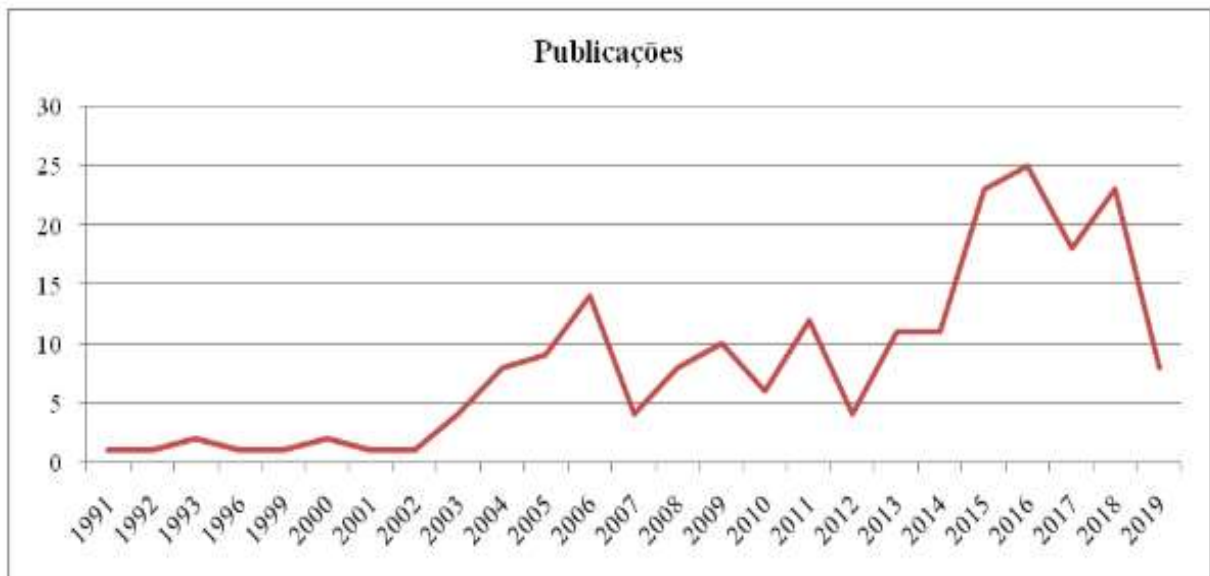
O reparo é a parte da manutenção corretiva que restaura o item ao estado em que se encontrava imediatamente antes da falha (NBR 5462, 1994; SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007). Viana (2002) define mantabilidade como a capacidade de um item de ser mantido ou recolocado em condição de executar suas funções requeridas, de acordo com as especificações de uso, quando a manutenção é realizada conforme condições determinadas, como procedimentos e meios prescritos.

Confiabilidade é a capacidade de um item de desempenhar uma função requerida sob condições específicas, durante um intervalo de tempo (NBR 5462-1994). Para Fogliato e Ribeiro (2009), confiabilidade é uma metodologia científica aplicada na identificação do desempenho ou comportamento dos equipamentos durante um período de tempo e em condições operacionais pré-estabelecidas, sem falhar.

A atividade de manutenção tem evoluído significativamente, impulsionada pelo aumento da quantidade e diversidade de itens físicos a serem mantidos, projetos cada vez mais complexos, novas técnicas de manutenção e uma visão estratégica da manutenção para melhorar a competitividade das empresas (KARDEC; NASCIF, 2009). A evolução da manutenção pode ser dividida em quatro fases desde 1930:

- **Primeira Geração:** Iniciada no período Pós-guerra, entre 1940 e 1950, caracterizada por equipamentos simples, pouco mecanizados e superdimensionados. A manutenção era essencialmente corretiva não planejada, com ações de limpeza, lubrificação e reparos pós-quebra (KARDEC; NASCIF, 2009; MOBLEY; HIGGINS; WIKOFF, 2008; MOUBRAY, 1997).
- **Segunda Geração:** Entre 1960 e 1980, a industrialização aumentou a dependência de produtos e processos industriais, elevando a concorrência. Surgiu a necessidade de técnicas de manutenção preventiva para aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos. Inicia-se aqui as técnicas de planejamento de atividades e a inserção de grandes e lentos computadores (SIQUEIRA, 2005; KARDEC; NASCIF, 2009; MOUBRAY, 1997).
- **Terceira Geração:** Iniciada na década de 1980, a crescente automação e mecanização, juntamente com a terceira revolução industrial, destacou a importância da confiabilidade e disponibilidade. A manutenção centrada na confiabilidade (RCM) emergiu como uma metodologia crucial, utilizando cálculos de confiabilidade para definir atividades de manutenção (KARDEC; NASCIF, 2009; SIQUEIRA, 2005).
- **Quarta Geração:** A partir do final dos anos 1990, a manutenção focou na redução de intervenções na planta, utilizando práticas de manutenção preditiva que avançaram fortemente após o ano de 2005 com o desenvolvimento do conceito de manutenção 4.0 com temas relacionados *Smart Maintenance*, *Smarter Maintenance*, *Intelligent Maintenance*, *Real Time Maintenance*, *Ubiquitous Maintenance*, *eMaintenance* e *Maintenance 4.0*, como mostrado na pesquisa realizada por Dockhorn e Barbalho (2019), eu indicou um aumento tímido de publicações científicas em meados de 2003 e um aumento expressivo entre 2012 e 2019, como mostra o gráfico abaixo (Figura 3).

Figura 3 - Distribuição das publicações por ano dos 208 artigos relacionados à Manutenção 4.0, plataforma *Scopus*.



Fonte: Dockhorn e Barbalho (2019).

Outra informação de grande interesse encontrada neste estudo, é que a partir de 2012, o Brasil que antes não aparecia em nenhuma publicação, agora aparece em terceiro lugar. Isso faz grande sentido, pois é notável no setor industrial, incluído o Sucroenergético, a chegada de grandes ferramentas para monitoramento *online* de vibrações, termografias entre outras técnicas avançadas de manutenção. Além de informações em tempo real, onde o sistema de automação dos processos industriais, podem impedir eventual quebra precoce através da tecnologia avançada.

A Engenharia de Manutenção busca garantir disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade, com menor aplicação de manutenção preventiva programada e corretiva não planejada (KARDEC; NASCIF, 2009) (Figura 4).

Figura 4 - As quatro gerações da manutenção.



Fonte: Adaptação de Moubray, J. (1997); Lafraia (2008); Dockhorn e Barbalho (2019).

A implementação bem-sucedida da manutenção moderna exige o uso de referenciais de excelência, um plano de ação com padrões e procedimentos claros, e a aplicação integrada do conceito desde o projeto até a operação plena da unidade, com feedback contínuo para novos projetos (KARDEC; NASCIF, 2009).

Vaccaro (1997) destaca que a busca por vantagens competitivas é uma das metas mais importantes das empresas. A função manutenção, historicamente vista como um "mal necessário", tem sido reconhecida como crítica para o sucesso de longo prazo das organizações. A gestão da manutenção, ao melhorar a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, contribui significativamente para a competitividade empresarial (SELLITTO; BORCHARDT; ARAUJO, 2002; SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007).

Leal, Baffa e Garcia (2006) resumem a contribuição da manutenção em um sistema produtivo como a maior disponibilidade confiável da planta ao menor custo, resultando em maior produtividade. Slack, Chambers e Johnston (2002) distinguem manutenção como função (parte da organização responsável pela disponibilidade dos equipamentos) e manutenção como processo (transformação de recursos para gerar disponibilidade).

Atividades de manutenção devem ser divididas em duas categorias: aquelas executadas diretamente nos equipamentos e aquelas que envolvem estudos e planejamento estratégicos para otimizar a eficiência e eficácia da manutenção.

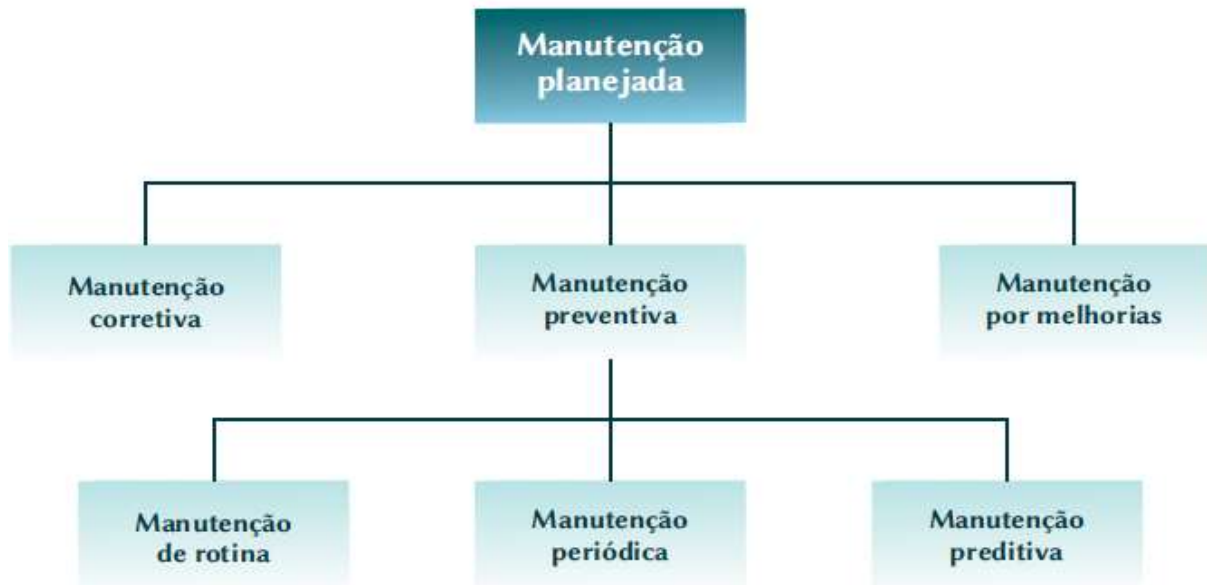
2.1.1 Tipos de Manutenção

Ramos *et al.* (2014) observam que, ao longo do tempo, os tipos de manutenção se tornaram mais abrangentes para atender às novas exigências do mercado. Entre as abordagens mais conhecidas estão a manutenção corretiva, a manutenção preventiva e a manutenção preditiva. A manutenção corretiva ocorre após a falha, restaurando a funcionalidade do equipamento. A manutenção preventiva envolve intervenções programadas com base no tempo ou uso, para evitar falhas. Já a manutenção preditiva se baseia no monitoramento contínuo das condições do equipamento, permitindo a intervenção antes que ocorra uma falha, com base em dados reais de desempenho.

Os métodos de manutenção indicam como a intervenção nos equipamentos é realizada. Na literatura, há diversas maneiras de classificar os tipos de manutenção. Segundo Zaions (2003), a classificação mais apropriada é entre manutenção não planejada e planejada. A manutenção não planejada corrige falhas após sua ocorrência, gerando perdas de produção, qualidade do produto e elevados custos. A manutenção planejada, por outro lado, diminui a perda de produção, minimiza custos e reduz o tempo de reparo.

Sellitto (2014) relata a manutenção planejada em: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção por melhorias. A Figura 5 ilustra essa classificação, além da subdivisão da manutenção preventiva em manutenção de rotina, manutenção periódica e manutenção preditiva.

Figura 5 - Método de manutenção planejada.



Fonte: Fachini; Sellito (2014).

Essas diferentes abordagens de manutenção refletem a evolução das práticas industriais e a crescente complexidade dos sistemas produtivos. A escolha da estratégia de manutenção mais adequada depende de vários fatores, incluindo o tipo de equipamento, as condições operacionais, os custos envolvidos e a criticidade das operações. Assim, a gestão eficaz da manutenção requer uma compreensão profunda dessas abordagens e a capacidade de implementá-las de maneira integrada e alinhada com os objetivos estratégicos da organização. Algumas ferramentas de gestão de manutenção estão em constante evolução, como o TPM (Manutenção Produtiva Total) e o RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade) que serão explorados mais à frente.

2.1.1.1 Manutenção Corretiva

Na manutenção corretiva, os reparos são realizados após a ocorrência de uma falha ou quebra, com o objetivo de restaurar a funcionalidade do equipamento. Segundo Stefanini (2011), a manutenção corretiva visa reparar as falhas inesperadas o mais rápido possível. Para reduzir o tempo de reparo e diagnóstico, é essencial qualificar o pessoal por meio de treinamento adequado e gerenciar eficientemente as peças de reposição, otimizando assim os recursos.

Uma parte significativa do esforço na gestão da manutenção é direcionada à manutenção corretiva, tornando-a crucial para a efetividade da gestão (DHILLON, 2002). O

principal objetivo da manutenção corretiva é corrigir ou restaurar as condições de funcionamento de equipamentos ou sistemas com desempenho deficiente ou falhas (VAZ, 2003).

Conforme Branco Filho (2008), as manutenções corretivas podem ser classificadas em duas categorias: manutenção corretiva programada, onde a correção das falhas ocorre em uma data posterior ao evento, deixando a máquina em estado de falha até o reparo; e manutenção corretiva de emergência, que não pode ser adiada e deve ser realizada imediatamente após a falha. Mesmo na manutenção corretiva, é fundamental identificar e bloquear as causas fundamentais da falha para evitar sua reincidência.

(1)Manutenção Corretiva Planejada: Ao contrário da manutenção de emergência, a manutenção corretiva planejada é realizada com base na ocorrência de falhas ou deficiências identificadas, visando eliminar não apenas os sintomas, mas também as causas das falhas. Esta abordagem busca reparar componentes ou sistemas durante a manutenção preventiva (DHILLON, 2006; MOBLEY; HIGGINS; WIKOFF, 2008). A manutenção corretiva planejada visa eliminar reparos de emergência, propondo uma manutenção completa que reduz intervenções desnecessárias, otimiza as atividades de manutenção, diminui o custo do ciclo de vida e aumenta a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos (MOBLEY; HIGGINS; WIKOFF, 2008).

(2)Manutenção Corretiva de Emergência: Também conhecida como manutenção não planejada, essa abordagem é reativa e ocorre após a falha, focando no rápido restabelecimento das funções do equipamento. Embora essencial para situações imediatas, essa manutenção é ineficiente e cara, pois os reparos não são planejados e não eliminam as causas das falhas, resultando em uma manutenção incompleta. Isso reduz a confiabilidade do equipamento, aumenta a frequência de falhas e eleva os custos de manutenção (KARDEC; NASCIF, 2009; MOBLEY; HIGGINS; WIKOFF, 2008; VAZ, 2003). Devido ao seu caráter reativo, a manutenção corretiva não planejada exige um grande estoque de peças de reposição, resultando em altos custos de inventário (MOBLEY, 2002).

De acordo com a NBR 5462-1994, a manutenção corretiva é executada após a ocorrência de uma pane, com o objetivo de recolocar um item em condições de desempenhar sua função requerida. Quando realizada sem planejamento, essa manutenção pode levar a falhas aleatórias em momentos inoportunos, riscos aos demais componentes do sistema e custos

adicionais de manutenção. Para Kardec e Nascif (2009), a manutenção corretiva atua na correção de falhas ou desempenho inferior ao esperado, e pode ser dividida em manutenção corretiva planejada e não planejada.

Desta forma, manutenção corretiva, apesar de essencial, deve ser cuidadosamente gerenciada e integrada com outras estratégias de manutenção para minimizar custos, aumentar a confiabilidade e garantir a continuidade operacional dos sistemas produtivos.

2.1.1.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva consiste em atividades realizadas em intervalos predeterminados ou conforme critérios específicos, podendo ser baseadas no tempo de calendário, número de horas trabalhadas ou número de partidas de um sistema. A manutenção preventiva é uma intervenção planejada e programada antes da provável ocorrência de uma falha, com o objetivo de maximizar a utilização do equipamento nas tarefas de produção, reduzindo o tempo de inatividade e os custos de manutenção (ZAIONS, 2003).

Fachini e Sellito (2014) destaca algumas dificuldades potenciais na implementação da manutenção preventiva, como a falta de capacitação do pessoal, a desatualização dos planos de manutenção ao longo da vida útil do equipamento, o não cumprimento do plano de manutenção devido à não liberação da máquina, a ausência de informações nas planilhas para os técnicos de campo e a falta de análise das intervenções anteriores. Segundo Stefanini (2011), a manutenção preventiva é realizada com base em critérios predeterminados para reduzir a probabilidade de falha de uma planta ou a degradação de um serviço, sendo estruturada em um calendário de inspeções e procedimentos de manutenção.

A manutenção de rotina envolve serviços de inspeção e verificação das condições técnicas dos itens físicos. Mirschawka e Olmedo (1993) definem a manutenção de rotina como intervenções leves realizadas em intervalos predeterminados. Lima (2000) tratam a manutenção de rotina como manutenção autônoma, onde a responsabilidade é compartilhada entre o pessoal de manutenção e os operadores, com o objetivo de evitar a degradação dos itens físicos.

A manutenção periódica utiliza registros para controle estatístico de parâmetros importantes dos equipamentos. Fachini e Sellito (2014) afirma que essa abordagem melhora a utilização dos equipamentos por meio da análise estatística das falhas. Lafraia (2001) ressalta que a manutenção periódica requer intervenções predeterminadas, independentemente do

estado do componente, para reduzir ou eliminar a probabilidade de falha ou perda de desempenho, conforme um plano prévio.

2.1.1.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva tem como principal objetivo prevenir falhas através do acompanhamento contínuo dos parâmetros de estado e condição de desempenho dos componentes ou sistemas. A decisão de realizar a manutenção baseia-se nos resultados deste monitoramento (HORNER; EL-HARAM; MUNNS, 1997; MOBLEY, 2002; VAZ, 2003).

A manutenção preditiva representa uma grande quebra de paradigma na manutenção, intensificando-se com o desenvolvimento tecnológico que permite uma avaliação mais confiável das instalações e sistemas operacionais em funcionamento (KARDEC; NASCIF, 2009). Este tipo de política requer um sistema de informações eficaz para registrar o estado dos equipamentos (VAZ, 2003). Esta atividade, monitora as condições dos equipamentos e seus principais parâmetros de operação. Branco Filho (2008) destaca a necessidade de intervenção tecnológica para o monitoramento. A manutenção preditiva utiliza controles estatísticos para prever falhas ou corrigir desempenhos insatisfatórios, com base em modificações significativas nos parâmetros de condição ou desempenho. A manutenção preditiva deve detectar variações significativas dos parâmetros o mais cedo possível, permitindo calcular a probabilidade de falha e programar intervenções quando necessário (TAVARES, 1999).

De acordo com Mobley (2002), a manutenção preditiva é uma filosofia que utiliza o estado atual de operação do equipamento para otimizar a operação total da planta fabril. A manutenção é executada quando se aproxima ou se atinge o limite pré-estabelecido de degradação do equipamento, permitindo assim a operação contínua pelo maior tempo possível (VAZ, 2003).

O monitoramento da condição de desempenho pode variar desde inspeções visuais simples até inspeções avançadas com o uso de ferramentas e técnicas de monitoramento (HORNER; EL-HARAM; MUNNS, 1997).

As técnicas preditivas mais utilizadas na indústria incluem "Ensaio por Ultrassom", "Análise de Vibrações Mecânicas", "Análise de Óleos Lubrificantes" e "Termografia". Estas técnicas visam determinar o momento correto da próxima intervenção para manutenção, evitando desmontagens desnecessárias e maximizando a vida útil do componente (VIANA, 2002). A manutenção preditiva permite prever as condições do equipamento, com correção

realizada por meio de uma manutenção corretiva programada, permitindo a preparação prévia do serviço e decisões relacionadas à produção (KARDEC; NASCIF, 2009).

A manutenção preditiva, que ganhou força a partir da década de 60, é o tipo de manutenção que mais evoluiu devido ao desenvolvimento da eletrônica. Esta constante evolução torna a manutenção preditiva uma prática cada vez mais adotada na indústria (KARDEC; NASCIF, 2009).

Desta forma, a manutenção preditiva baseia-se na condição do equipamento, realizando intervenções somente quando necessário e seguindo uma sistemática de acompanhamento (KARDEC; NASCIF, 2009). Esta abordagem, ao permitir a operação contínua e otimizada dos equipamentos, representa uma estratégia avançada e eficiente para a gestão da manutenção industrial.

2.1.1.4 Manutenção por melhorias

Na manutenção por melhorias, os equipamentos são continuamente aprimorados além de suas especificações originais. Em vez de apenas restaurar os equipamentos às suas condições iniciais após falhas, a manutenção por melhorias busca constantemente aperfeiçoar os equipamentos, modificando seu projeto, padrões de operação e manutenção conforme necessário. Este é um ponto crítico nas empresas brasileiras, onde muitas vezes a manutenção é considerada completa ao consertar o defeito e restituir o item à sua condição operacional (PALMER, 2000).

Palmer (2000) observa que, em algumas organizações, a manutenção apenas resolve emergencialmente os problemas, removendo os sintomas da falha sem corrigir a causa subjacente. Outras organizações, no entanto, treinam seus técnicos de manutenção para analisar as causas das falhas e sugerir melhorias após identificar a causa raiz durante o atendimento do problema.

De acordo com Zaions (2003), a manutenção por melhorias é especialmente aplicável quando a vida útil do equipamento é curta, a frequência de falhas é alta, os custos de manutenção são elevados, o tempo de reparo é longo, há risco de propagação da falha e a dispersão do tempo médio entre falhas é grande, dificultando a avaliação e inspeção.

Fachini e Sellito (2014) destaca que o melhoramento pode incluir projetar modificações que reduzam o tempo de execução, analisando a segurança operacional ou de

manutenção para atender normas e leis. Este processo pode ser classificado em duas categorias principais:

(1) **Reforma (overhaul):** Intervenção que envolve a substituição significativa de partes do equipamento.

- Corrige a degradação do equipamento.
- Exige um planejamento extenso.

(2) **Modernização (retrofitting):** Reforma que inclui a atualização tecnológica do equipamento.

- Corrige a inadequação da tecnologia aos objetivos da empresa, envolvendo a substituição de subsistemas.
- Requer um planejamento detalhado.

Fachini e Sellito (2014) enfatiza que entre os diversos tipos de manutenção, uma modalidade não deve necessariamente substituir outra, mas pode e deve ser combinada com outras para alcançar resultados satisfatórios dentro de uma estratégia de produção (ZAIIONS, 2003).

2.1.1.5 Manutenção Produtiva Total

A Manutenção Produtiva Total (TPM) teve suas origens nos Estados Unidos por volta de 1950. Com a evolução dos sistemas de manutenção, a indústria japonesa adotou essa ferramenta de gestão na década de 1970. Posteriormente, a TPM retornou aos Estados Unidos em 1987 e foi introduzida no Brasil pelo Dr. Seiichi Nakajima, que pregava a filosofia de que “da minha máquina cuido eu”, enfatizando que a prevenção de falhas deveria ser responsabilidade do operador.

De acordo com Murça (2012), em 1953, uma equipe de empresários japoneses visitou os Estados Unidos para estudar a Manutenção Produtiva Americana. Esta pesquisa levou à criação do *Japan Institute of Plant Engineers* (JIPE). A primeira indústria japonesa a implementar essa metodologia foi a Nippondenso, fornecedora de componentes para a Toyota. A TPM é uma filosofia de manutenção que busca manter instalações, máquinas e equipamentos operando eficientemente.

A TPM abrange a Manutenção Preventiva e Preditiva, incorporando procedimentos que envolvem funcionários e a empresa. Isso inclui reparos corretivos, gestão mecânica da

manutenção, manutenção preventiva e preditiva, abordagem participativa e autônoma, além da incorporação de melhorias contínuas.

Gonçalves (2015) define a TPM como uma estratégia de manutenção destinada a maximizar a eficiência dos equipamentos através de uma abordagem sistemática que cobre a vida útil dos equipamentos, desde o planejamento até a manutenção. Essa metodologia envolve todos os níveis da organização, desde executivos até operadores de produção.

O objetivo da TPM é melhorar a estrutura da indústria, tanto material quanto humana, mantendo máquinas e equipamentos em condições ideais de uso e promovendo treinamentos para capacitar os profissionais. Dessa forma, busca-se alcançar a meta de rendimento operacional global.

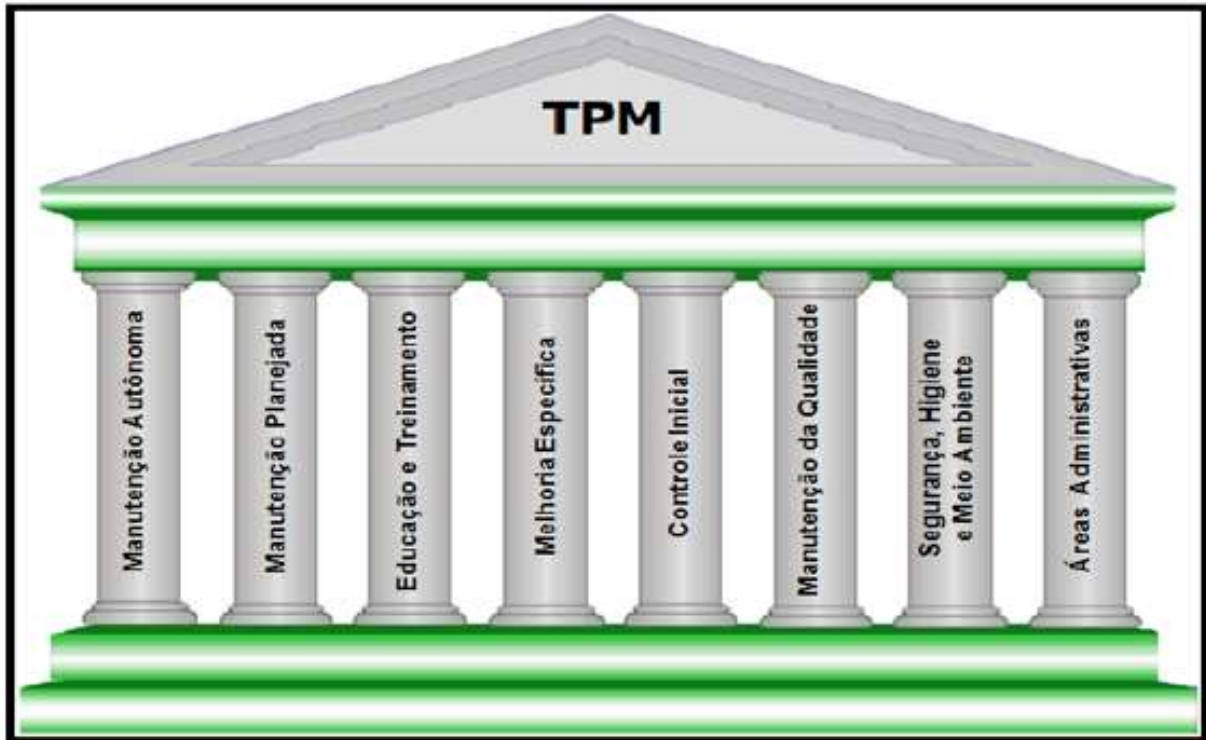
Segundo Gonçalves (2015), o objetivo global da TPM é a melhoria da estrutura da empresa, cuidando de máquinas, equipamentos, ferramentas, matéria-prima e produtos. Além disso, visa o aprimoramento das capacitações pessoais, englobando conhecimentos, habilidades e atitudes. A TPM envolve todos os departamentos da empresa, incluindo manutenção, operação, transportes, engenharia de projetos, planejamento, estoques e armazenagem, compras, finanças e contabilidade.

A TPM é uma abordagem gerencial que libera a criatividade frequentemente inexplorada dos trabalhadores. Quando os trabalhadores são incentivados a contribuir, mesmo em tarefas repetitivas, eles podem agregar valor significativo ao processo, aprendendo mais sobre as máquinas e focando no diagnóstico de problemas e melhorias de equipamentos.

Para atingir suas metas, a TPM busca defeito zero, falha zero, aumento da disponibilidade de equipamentos e lucratividade. Isso é alcançado através de um plano de ação baseado em pilares fundamentais como eficiência, autorreparo, planejamento, treinamento e ciclo de vida.

Os oito pilares da TPM são a base de um programa que envolve toda a empresa nas principais metas. Gonçalves (2015) define os pilares da seguinte forma (Figura 6).

Figura 6 - Pilares da TPM.



Fonte: Gonçalves (2015).

(1) **Manutenção Autônoma** (*Jishu Hosen*): Objetiva melhorar a eficiência dos equipamentos, desenvolvendo a capacidade dos operadores para pequenos reparos e inspeções, mantendo o processo conforme padrões estabelecidos e antecipando problemas potenciais.

(2) **Manutenção Planejada**: Foca na conscientização das perdas devido a falhas de equipamentos e mudanças de mentalidade nas divisões de produção e manutenção, minimizando falhas e defeitos com o mínimo custo.

(3) **Melhorias Específicas** (*Kobetsu-Kaizen*): Este pilar se concentra em erradicar de forma concreta as oito grandes perdas que reduzem o *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) dos equipamentos. Ao eliminar essas perdas, a eficiência global do equipamento melhora. Através desse indicador, é possível verificar se a utilização do equipamento está sendo plena.

(4) **Educação e Treinamento**: O objetivo desse pilar é promover um sistema de capacitação para todos os funcionários, tornando-os aptos a desenvolver suas atividades com responsabilidade e segurança. Isso promove um ambiente de

trabalho saudável, desenvolvendo novas habilidades e conhecimentos tanto para o pessoal de manutenção quanto para a produção.

(5) *Hinshitsu Hozen* (Manutenção da Qualidade): Este pilar compreende atividades destinadas a definir condições dos equipamentos que excluam defeitos de qualidade, mantendo-os em perfeitas condições para assegurar a qualidade dos produtos produzidos.

(6) Controle Inicial: Envolve atividades que visam à redução das perdas durante o período entre o desenvolvimento do produto e o início da produção plena. Isso inclui o efetivo desenvolvimento do produto e investimentos em equipamentos para atingir uma produção plena e eficiente. Esse pilar consolida uma sistemática para identificar e resolver inconveniências e imperfeições, mesmo em máquinas novas, incorporando melhorias através dos conhecimentos adquiridos.

(7) Administrativo: Este pilar assegura que todas as atividades da organização sejam eficientes. O setor administrativo é responsável por conduzir o programa TPM e formar equipes de melhorias que utilizem a Metodologia de Análise de Solução de Problemas (MASP) para resolver problemas e contabilizar possíveis ganhos.

(8) Segurança, Saúde e Meio ambiente: Este pilar é responsável por manter indicadores de acidente zero, doenças ocupacionais zero e danos ambientais zero, além de garantir a preservação da saúde e bem-estar dos funcionários e do meio ambiente.

O Programa TPM visa evitar perdas de tempo, dinheiro e trabalho. As principais proposições da TPM são evitar perdas por quebras de equipamentos, demoras na troca de moldes e regulagens, tempos de espera, redução de velocidade em relação ao padrão normal, defeitos na produção e queda no rendimento. A ideia é que, quando a máquina quebra, a falha visível é resultado de uma série de falhas invisíveis. Gavioli *et al.* (2013) definem que a TPM consiste em um programa para evitar perdas na produção através das falhas dos equipamentos, com o principal objetivo de maximizar a eficiência na produção.

A TPM visa aumentar a produtividade, melhorar a moral e a satisfação dos colaboradores, colocando ênfase na manutenção como uma atividade vital e lucrativa para os negócios.

A Manutenção Preditiva Total é uma metodologia de gestão que pode melhorar a estrutura da empresa, sendo um sistema de organização do trabalho. Na TPM, o operador é

treinado para fazer pequenos reparos nas máquinas, como limpeza, lubrificação, ajustes e verificações. A equipe de manutenção, por sua vez, fica responsável por inspeções, revisões e reparos complexos. Com esse sistema, a empresa pode ter ganhos significativos em termos de disponibilidade das máquinas, dos equipamentos e dos produtos.

Lima, Santos e Sampaio (2010) explicam que a TPM considera que a deterioração das máquinas é acelerada pela operação abusiva e pela falta de cuidados primários, como lubrificação, reparo e limpeza, que podem ser realizados pelos próprios operadores. Com esses cuidados, os operadores podem retardar as necessidades de Manutenção Preventiva, evitando falhas onerosas e desnecessárias.

2.1.2 Engenharia de Confiabilidade

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), conhecida em inglês como *Reliability Centred Maintenance* (RCM), é um método estruturado para determinar a melhor estratégia de manutenção para sistemas ou equipamentos. Este método começa com a identificação da funcionalidade ou desempenho requerido do equipamento no seu contexto operacional. Em seguida, identifica-se os modos de falha, suas causas prováveis e se detalham os efeitos e consequências dessas falhas. Isso permite avaliar a criticidade das falhas e identificar onde as consequências significativas podem impactar a segurança, disponibilidade ou custo. A metodologia, então, seleciona as tarefas de manutenção apropriadas para os modos de falha identificados.

Dias (2010) argumenta que a MCC busca um sistema de gestão da manutenção que forneça melhores resultados que a Manutenção Centrada no Reparo (MCR). Nesse contexto, a RCM ganha destaque. Originada na indústria aeronáutica na década de 1970, a RCM foi adotada por diversos setores, incluindo forças armadas, energia nuclear, óleo e gás (BRAUER; BRAUER, 1987; RAUSAND, 1998).

A RCM analisa e classifica os modos de falha, suas severidades, efeitos e possibilidades de ocorrência, utilizando modelos probabilísticos para determinar o risco da operação em certas circunstâncias (SELLITTO; BORCHARDT; ARAUJO, 2002). Com mais de 20 anos de aplicação bem-sucedida, várias indústrias relataram uma significativa redução nos custos de manutenção preventiva e um aumento na disponibilidade dos sistemas (RAUSAND, 1998).

De acordo com Carretero *et al.* (2003), existem várias definições para RCM, mas em resumo, ela é uma abordagem sistemática que aborda a funcionalidade dos sistemas, falhas dessas funcionalidades, causas e efeitos de falhas e a infraestrutura afetada por elas. Afefy (2010) reforça que a RCM é uma das ferramentas mais conhecidas e utilizadas para preservar a eficiência operacional dos sistemas, equilibrando os altos custos de manutenção corretiva e preventiva, considerando a vida útil do item (AFEFY, 2010; YSSAAD; KHIAT; CHACKER, 2014).

A RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade) é capaz de reduzir tanto a probabilidade de falhas quanto os custos de manutenção através de análises quali-quantitativas de falhas. Esse processo substitui atividades preventivas de alto custo por procedimentos mais adequados e econômicos. É crucial entender o contexto operacional do equipamento, pois máquinas idênticas podem necessitar de diferentes tarefas de manutenção conforme seu ambiente de operação (PEREIRA, 2009 *apud* DIEDRICH; SELLITTO, 2014).

Estudos realizados por Oliveira e Silva (2013) demonstram que o conceito de produtividade na manutenção pode ser definido pela relação entre faturamento e custo. O faturamento e os custos fornecem um referencial claro da produtividade da função de manutenção. Para alcançar a produtividade máxima, é necessário maximizar o faturamento e reduzir os custos.

Oliveira e Silva (2013) sugerem que, para maximizar o faturamento, é fundamental otimizar a disponibilidade e a confiabilidade dos equipamentos. Isso pode ser alcançado por meio das seguintes ações:

- (1) Aumento da campanha das unidades produtivas: Estender o tempo de operação entre reparos programadas.
- (2) Minimização dos prazos médios de reparo dos sistemas: Reduzir o tempo necessário para realizar manutenções programadas.
- (3) Minimização do tempo médio para reparo (MTTR): Diminuir o tempo necessário para consertar falhas quando elas ocorrem.
- (4) Maximização do tempo médio entre as falhas (MTBF): Aumentar o intervalo de tempo entre falhas consecutivas.

O indicador de disponibilidade considera dois fatores principais: a manutenibilidade (MTTR) e a confiabilidade (MTBF). A combinação desses três indicadores fornece uma visão geral do desempenho do equipamento ou sistema. A equação (2.1) é uma das formas utilizadas

para calcular a disponibilidade, integrando esses indicadores para proporcionar uma avaliação precisa da eficiência operacional.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.1)$$

Sendo, A = Disponibilidade.

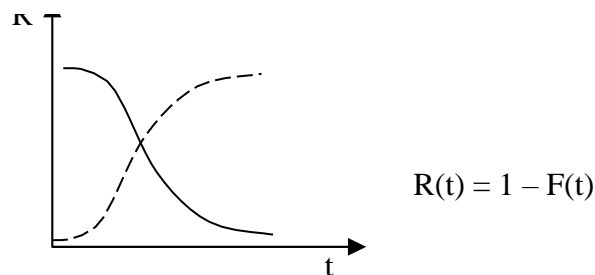
O principal objetivo da RCM é criar uma rotina de manutenção que preserve as funções dos sistemas e equipamentos de forma efetiva e com custos adequados (RAUSAND, 1998). Vaccaro (1997) define confiabilidade como a probabilidade de um equipamento ou sistema não falhar durante um intervalo de tempo especificado, sendo essa a probabilidade de que o mesmo esteja em pleno funcionamento até o instante t. É a probabilidade de que uma parte, componente, aparelho, equipamento ou sistema execute sua função conforme esperado por um período específico sob determinadas condições.

A Figura 7 mostra o gráfico da curva básica de confiabilidade e o da curva de probabilidade de falha, seu complementar, onde:

R(t): probabilidade de que um sistema opere sem falha por um comprimento de tempo t;

F(t): probabilidade de que ocorra falha num tempo menor ou igual a t.

Figura 7 - Gráfico mostrando a curva básica de confiabilidade (linha cheia)



Fonte: Vaccaro (1997)

Estudos sobre a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) concluíram que quando se assume que todos os equipamentos ou sistemas seguem a mesma curva de falhas, o impacto dessa metodologia na confiabilidade final é limitado (BRAND, 2011). Isso ocorre porque diferentes equipamentos não apresentam o mesmo comportamento de falhas. Por exemplo, um programa de computador, que pode ser considerado um sistema, geralmente passa

apenas pela fase de mortalidade infantil da curva de falhas (LAFRAIA, 2001; MENGUE, SELBITTO, 2013).

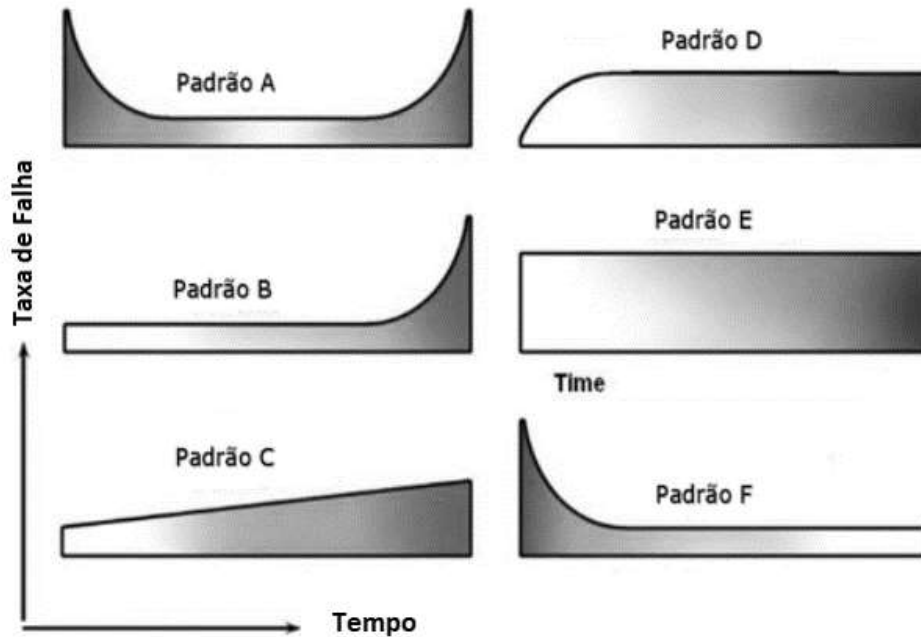
Com a evolução e aumento da complexidade dos equipamentos e sistemas, o padrão de falhas também mudou. Assim, o processo de MCC passou a adotar seis tipos de curvas de falhas, conforme ilustrado na Figura 8, para caracterizar a vida útil dos equipamentos e sistemas, em vez de usar apenas a tradicional curva da banheira. Este conjunto de curvas foi identificado em um estudo realizado pela United Airlines, conforme explicado por Kardec e Nascif (2009).

Equipamentos operando sob as mesmas condições podem exibir comportamentos de falhas diferentes devido a fatores variados (KOMNINAKIS, 2017). Portanto, quando se assume que todos os equipamentos seguem a mesma curva de falhas ao longo de seu ciclo de vida, a aplicação da MCC tem pouco efeito na melhoria da confiabilidade dos equipamentos.

Lafraia (2001) destaca que nem todos os equipamentos ou sistemas passam por todas as fases da curva da banheira. Alguns podem apresentar apenas a fase de mortalidade infantil, por exemplo. Assim, é possível afirmar que os equipamentos ou sistemas podem apresentar apenas algumas fases da curva da banheira ao longo de seu ciclo de vida, e não necessariamente todas (KOMNINAKIS, 2017).

Atualmente, a MCC utiliza seis modelos de curvas de falhas para caracterizar a vida útil dos equipamentos, conforme mostrado na Figura 8, e não se limita apenas à curva da banheira (KARDEC; NASCIF, 2009).

Figura 8 - Tipos de Curva.



Fonte: Adaptado de Moubray (1997).

Vários estudos, incluindo os trabalhos de Kardec e Nascif (2009) e Moubray (1997), identificam a existência de seis padrões de falha distintos, descritos a seguir:

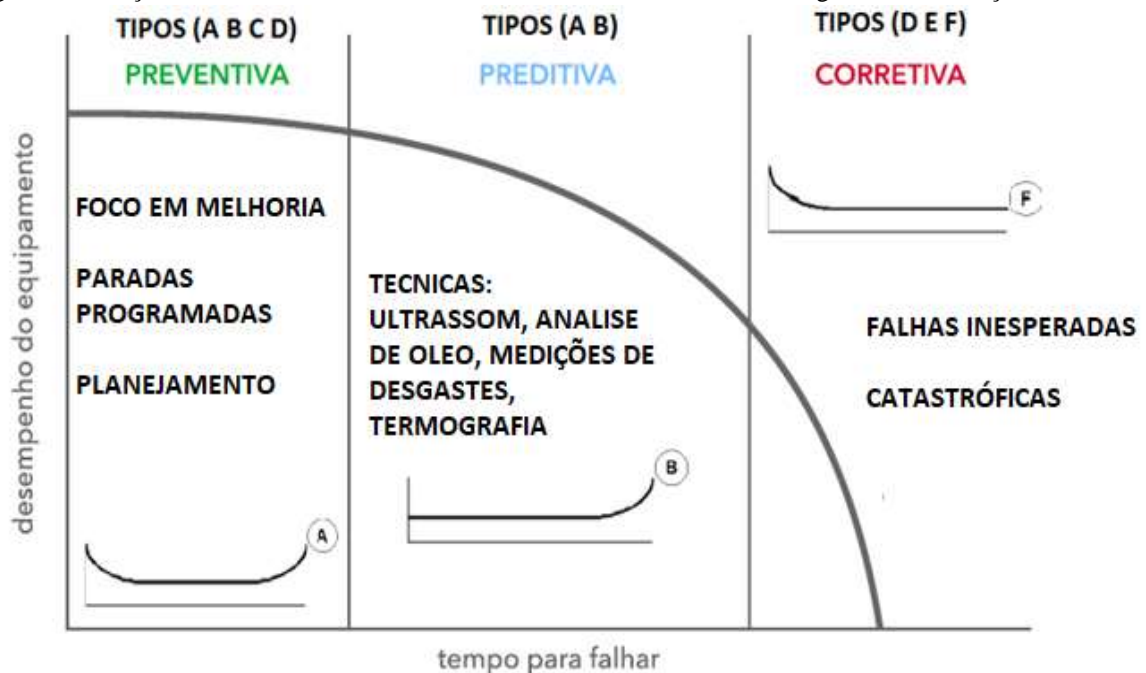
- Padrão Tipo A – Curva da banheira inicial
Este padrão é conhecido como a curva da banheira em seu estágio inicial. Caracteriza-se por uma alta probabilidade de falhas quando o ativo é novo, seguida por um baixo nível de falhas aleatórias durante a maior parte de sua vida útil, culminando em um aumento acentuado de falhas no final de sua vida útil.
- Padrão Tipo B – Desgaste tradicional: este padrão consiste em um baixo nível de falhas aleatórias durante a maior parte da vida útil do ativo, seguido por um aumento acentuado de falhas no final de sua vida útil.
- Padrão Tipo C – Ascensão gradual sem zona de desgaste distinta: o padrão C é relacionado com a “curva da fadiga” e é caracterizado por um nível de falha crescente ao longo da vida do ativo.
- Padrão Tipo D – Aumento inicial com uma desaceleração – Falha Aleatória: intitulado como a quebra inicial na curva, este padrão começa com um nível muito baixo de falhas, que aumenta até atingir um nível constante.
- Padrão Tipo E – Falha aleatória: neste padrão, as falhas são aleatórias e constantes ao longo da vida útil do ativo.

- Padrão Tipo F – Mortalidade infantil: este padrão é conhecido como curva de mortalidade infantil e mostra uma alta taxa de falha inicial, seguida por um nível aleatório de falhas.

Ao analisar esses padrões, podemos compreender o comportamento dos ativos ao longo de sua vida útil. Assim, podemos agrupar os padrões em dois grandes grupos:

- ✓ Padrões A-B-C: estes padrões têm uma vida útil definida, na qual as taxas de falha aumentam quando o ativo atinge uma determinada idade. Normalmente, são falhas relacionadas ao tempo, uso em horas e volumes produzidos.
- ✓ Padrões D-E-F: estes padrões representam 89% das falhas e são denominados aleatórias ou casuais. Destacam o fato de que o início das falhas ocorre nos primeiros anos de vida do ativo, sendo induzidas pela manutenção, operações ou defeitos de fabricação. Uma vez que o período inicial tenha passado, as falhas tornam-se aleatórias.

Figura 9 - Relação entre as fases do ciclo de vida da curva da banheira e estratégias de manutenção.



Fonte: Adaptação Sellito (2005).

De acordo com Sellito (2005) e conforme apresentado na Figura 9, as estratégias de manutenção podem ser organizadas em conformidade com o padrão de falha, conforme abaixo:

(1) Mortalidade Infantil, falhas de origem: a recomendação é a Manutenção de Emergência ou Corretiva que retarda ou até impede o fim da mortalidade infantil ao não reforçar os itens que quebraram ou não remover as causas das falhas de origem.

(2) Maturidade, falhas aleatórias: a recomendação é utilizar as técnicas de manutenção Preditiva que informa o início e monitora os processos de falhas progressivas que resultarão em quebras, podendo prever aumentos na probabilidade de quebra.

(3) Desgaste, falhas progressivas: a recomendação é utilizar a Manutenção Preventiva que previne a emergência antecipando a troca à quebra que realmente vai ocorrer, porém a um custo interno mais alto do que a emergência.

Compreender como a máquina ou equipamento falha e/ou quebra e determinar um padrão desse comportamento é crucial. Com esse entendimento, podemos definir as melhores estratégias de manutenção.

Uma ótima estratégia, independentemente do padrão das falhas, é o monitoramento contínuo da máquina ou equipamento. Isso permite agir no momento certo para realizar a substituição ou revisão de componentes importantes. Essa técnica, baseada na condição do equipamento, é conhecida como a Manutenção Preditiva, já explanada anteriormente.

A utilização de indicadores de medição de vibração e temperatura é particularmente relevante, pois a maioria dos ativos possui sistemas ou mecanismos giratórios. Esse tipo de análise possibilita a previsão de problemas como desgastes, aquecimento, desnivelamento ou desbalanceamento, uma vez que tais problemas causam anomalias em vibração e temperatura.

Portanto, a manutenção moderna deve incorporar o uso de sistemas inteligentes capazes de prever tais eventos. Estar sempre um passo à frente das falhas potenciais que podem causar quebras é a estratégia mais adequada.

2.2 Conceitos da análise estatística de confiabilidade

Na análise de sobrevivência ou análise de confiabilidade, existem dois tipos principais de modelos de análise: os modelos não-paramétricos e os modelos paramétricos ou probabilísticos.

Os modelos não-paramétricos são aqueles que não requerem a especificação de uma distribuição de probabilidade específica para os dados de tempo de vida de um componente ou

sistema (RAUSAND, 1998). Esses modelos são úteis porque permitem explorar a natureza dos dados sem a necessidade de assumir uma forma particular para a distribuição subjacente. O uso de métodos não-paramétricos oferece uma visão inicial sobre a distribuição dos dados, ajudando a identificar padrões ou tendências sem se comprometer com uma distribuição específica (LEWIS, 1994).

Por outro lado, os modelos paramétricos ou probabilísticos exigem a especificação de uma distribuição de probabilidade que melhor se ajuste aos dados (COLOSIMO; GIOLO, 2006). Esses modelos são amplamente utilizados na área industrial, onde é possível planejar estudos de forma mais controlada e minimizar fontes de perturbação. A aplicação de técnicas paramétricas na indústria é favorecida porque permite uma análise mais precisa e detalhada dos dados de confiabilidade de componentes e equipamentos. A escolha de uma distribuição adequada é fundamental para obter resultados confiáveis e significativos.

Colosimo e Giolo (2006) apontam que o uso de técnicas paramétricas é mais frequente na indústria do que na área médica. Isso ocorre porque, na indústria, os estudos podem ser planejados com maior rigor, e as variáveis podem ser controladas de maneira mais eficiente, reduzindo a interferência de fatores externos e aumentando a precisão dos resultados.

Este trabalho focará na análise de confiabilidade utilizando modelos paramétricos. A escolha de modelos paramétricos permite uma abordagem detalhada e rigorosa na avaliação da vida útil de componentes e sistemas, proporcionando insights para a manutenção e otimização de processos industriais. A especificação adequada da distribuição de probabilidade é essencial para capturar com precisão o comportamento dos dados de tempo de vida, permitindo a identificação de padrões de falhas e a implementação de estratégias eficazes de manutenção preventiva e preditiva.

Fagundes (2011) destaca que, para estudos de confiabilidade em manutenção, é crucial determinar uma distribuição de probabilidade que se ajuste aos dados de tempo de vida do sistema. As principais distribuições de interesse em manutenção são: lognormal, Weibull, exponencial e gamma.

Estudos realizados por Cerveira e Sellitto (2015) mostram que a distribuição lognormal é mais utilizada para peças de desgaste, como componentes metálicos sujeitos a falha por fadiga do metal, trincas ou corrosão. Isso ocorre porque a distribuição lognormal pode descrever de forma precisa o tempo de vida dessas peças até a falha, considerando as variações naturais no desgaste dos materiais.

Por outro lado, a distribuição exponencial, que é uma distribuição contínua com taxas de falhas constantes, é utilizada para descrever falhas em sistemas complexos não redundantes ou em sistemas complexos com taxas de falhas independentes. Esta distribuição é particularmente útil para sistemas onde as falhas ocorrem de forma aleatória e independente ao longo do tempo, sem uma taxa crescente ou decrescente de falhas.

A distribuição gamma é uma generalização da distribuição exponencial e é utilizada para descrever sistemas que operam com componentes em paralelo, onde todos os componentes devem falhar para que o sistema como um todo falhe. Essa distribuição é adequada para modelar situações onde a redundância dos componentes aumenta a confiabilidade do sistema até que todos os componentes individuais falhem.

Por fim, a distribuição de Weibull é uma das mais importantes em modelos de confiabilidade devido à sua flexibilidade e capacidade de representar amostras de tempos até a falha com comportamentos distintos. A distribuição de Weibull pode ser ajustada para descrever diferentes padrões de falhas, como falhas iniciais, falhas aleatórias ou falhas por desgaste, e é especialmente útil em situações onde apenas pequenas amostras de dados estão disponíveis. Cerveira e Sellitto (2015) ressaltam a importância da distribuição de Weibull na análise de confiabilidade devido a essas características adaptativas.

2.2.1 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é a forma mais simples para descrever tempos de falha. A distribuição é caracterizada por uma função risco constante dada por,

$$\lambda(t) = \frac{1}{\alpha}, \alpha > 0, t > 0 \quad (3.11)$$

Em que α é o tempo médio de vida.

A função risco é conhecida também como a taxa de falha instantânea, se caracterizando, nesta distribuição pelo fato de ser independente de t , ou seja, a chance de falha em um intervalo de tempo não depende do tempo que o objeto permanece no estudo (falta de memória). A função de sobrevivência $S(t)$ é dada por:

$$S(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)\right\} \quad (3.12)$$

$$MTTF \text{ ou } MTBF = 1/\lambda$$

Sendo:

λ = taxa de falha;

t = tempo até a falha.

A função densidade de probabilidade para a variável aleatória tempo de falha T com distribuição exponencial é dada por,

$$f(t) = \frac{1}{a} \exp\left\{-\frac{t}{a}\right\}, t \geq 0 \quad (3.13)$$

Denota-se a distribuição exponencial (3.13) por $T \sim \text{Exp}(\alpha)$.

2.2.2 Distribuição de Weibull

As medidas de confiabilidade para as distribuições de Weibull são dadas pelas Eqs. (3.21) a (3.22).

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta^\gamma} t^{\gamma-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma\right\}, t \geq 0 \quad (3.21)$$

Para a distribuição de Weibull, a função de sobrevivência $R(t)$ é:

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma\right\} \quad (3.22)$$

E a taxa de falha é:

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta^\gamma} t^{\gamma-1} \quad (3.23)$$

$$MTBF = \theta \Gamma(1 + 1/\gamma) \quad (3.24)$$

Sendo:

Θ = parâmetro de escala;

γ = parâmetro de forma;

Γ = função gamma;

T = tempo até a falha

2.2.3 Distribuição Log-normal

A distribuição log-normal é muito usada em ciências físicas e sociais e em engenharia, neste último caso para descrever o tamanho de partículas, o tempo para haver uma falha no processo (confiabilidade) e o tempo para consertar algo no processo (manutenção). Desta forma, essa distribuição será utilizada no estudo de caso, atendendo o objetivo de monitorar os maiores ofensores médio de reparos industriais (maior MTTR).

As medidas de confiabilidade para as distribuições Log-normal são dadas pelas Eqs. (3.31) a (3.32).

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.31)$$

Para a distribuição Log-normal, a função de sobrevivência $R(t)$ é:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right) \quad (3.32)$$

E a taxa de falha é:

$$h(t) = \frac{\phi\left[\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right]}{\frac{\sigma t}{\phi\left[\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right]}} \quad (3.33)$$

$$MTBF = e^{(\mu + \sigma^2)/2} \quad (3.24)$$

Sendo:

$\Phi(x)$ = valor da função de distribuição da distribuição normal avaliada em x ;

$\phi(x)$ = valor da função de densidade da distribuição normal avaliada em x ;

$\mu(x)$ = média do logaritmo dos dados;

$\sigma(x)$ = desvio padrão do logaritmo dos dados;

$t(x)$ = o tempo até a falha.

2.2.4 Distribuição Gamma

As medidas de confiabilidade para as distribuições Gamma são dadas pelas Eqs. (3.41) a (3.42).

$$f(t) = \frac{1}{\Gamma(\gamma)} (\lambda t)^{\gamma-1} e^{-\lambda t} \quad (3.41)$$

Para a distribuição Log-normal, a função de sobrevivência $R(t)$ é:

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^{\lambda t} x^{\gamma-1} e^{-x} dx \quad (3.42)$$

E a taxa de falha é:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.43)$$

$$MTBF = \frac{\lambda}{\gamma} \quad (3.44)$$

Sendo:

Γ = função *gamma*;

γ = parâmetro de forma;

λ = parâmetro de escala;

t = tempo até a falha.

2.2.5 O Método de Máxima Verossimilhança

O método da máxima verossimilhança é o método mais comum para estimar os parâmetros das distribuições. A ideia é encontrar os valores dos parâmetros que maximizam a verossimilhança dos dados observados. A verossimilhança é a probabilidade de observar os dados sob as hipóteses do modelo. O algoritmo de otimização é utilizado para encontrar o valor dos parâmetros que maximiza a função de verossimilhança.

Para este estudo de caso, será utilizado a função Log-normal, que será justificada na próxima seção. Desta forma, pode-se verificar como o método fornece os estimadores de máxima verossimilhança nos parâmetros μ e σ abaixo:

- Log-Normal:

Suponha que temos uma amostra de n observações de tempo de falha T_1, T_2, \dots, T_n , que seguem uma distribuição Log-Normal com parâmetros μ e σ . A função de verossimilhança é dada por:

$$L(\mu, \sigma) = \prod_{i=1}^n \left[\frac{1}{T_i \sigma \sqrt{2\pi}} \right] * e^{\left(-\frac{(\ln(T_i) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right)} \quad (3.51)$$

O logaritmo natural da função de verossimilhança é:

$$\ln(L(\mu, \sigma)) \propto -n \ln(\sigma) - \sum_{i=1}^n \frac{[\ln(T_i) - (\mu + \frac{\sigma^2}{2})]^2}{2\sigma^2} \quad (3.52)$$

Para estimar os parâmetros μ e σ , deriva-se função logarítmica de verossimilhança em relação a μ e σ , igualamos a zero e resolvemos para μ e σ , resultando em:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(T_i)}{n} \quad (3.53)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{[\ln(T_i) - (\hat{\mu} + \frac{\hat{\sigma}^2}{2})]^2}{n} \right)} \quad (3.54)$$

Em resumo, para todas as distribuições apresentadas (Exponencial, Weibull e Log-Normal), utilizamos o método da máxima verossimilhança para estimar os parâmetros a partir dos dados amostrais. O estimador de máxima verossimilhança é aquele que maximiza a função de verossimilhança ou, equivalentemente, que minimiza a distância entre a distribuição amostral e a distribuição teórica.

2.3 Estudo da confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade na manutenção industrial

Esta seção inicia com uma revisão abrangente de artigos e trabalhos publicados em diversas bases de dados e periódicos científicos, como *ScienceDirect (Elsevier)*, *Scopus*,

Google Acadêmico, Periódicos CAPES, *Directory of Open Access Journals* (DOAJ) e *SciELO* Brasil. Essas fontes representam as principais publicações nas áreas de gestão, engenharia, operações, produção, fabricação, qualidade, confiabilidade e manutenção. Também foram exploradas bibliotecas virtuais de teses e dissertações, incluindo SBU (Unicamp), SIBi (USP), Teses USP, Athena (UNESP) e a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD).

A Figura 10 ilustra como foi a triagem das referências bibliográficas.

Figura 10 – Triagem das Referências Bibliográficas.

Confiabilidade RCM. Confiabilidade. Mantenabilidade. Análise de Lognormal. Manutenção Maintenance MCC Reliability. Maintainability Cana-de-açúcar Mills	<u>Primeira Triagem</u>		<u>Segunda Triagem</u>		
	<i>Tipo</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Porcentagem</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Porcentagem</i>
	Artigos Nacionais	62	42,5%	36	43,9%
	Artigos Internacionais	36	24,7%	23	28,0%
	Artigos de Conferência	18	12,3%	9	11,0%
	Livros	10	6,8%	8	9,8%
	Dissertações / TCC	12	8,2%	4	4,9%
	Web/Organizações	8	5,5%	2	2,4%
	Total	146	100,0%	82	100,0%

Filtro

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Com o objetivo de garantir a atualidade das descobertas, foram priorizadas publicações posteriores ao ano 2000, focando na conexão entre modelos de confiabilidade e estratégias de manutenção. As buscas em cada banco de dados foram realizadas com o uso de palavras-chave em português e inglês, como: Confiabilidade, Manutenção, Modelos de Manutenção, Estratégia de Manutenção, Funções de Confiabilidade, Sistemas Reparáveis, Mantenabilidade, Disponibilidade, Engenharia de Manutenção e Engenharia de Confiabilidade. Inicialmente, os estudos foram filtrados por meio de uma leitura preliminar dos títulos e resumos, a fim de identificar aqueles mais alinhados com os temas centrais da pesquisa. Além disso, trabalhos, teses, dissertações e livros importantes publicados antes de 2000 também foram considerados como referências, dada a sua significativa contribuição teórica.

A confiabilidade, mantenabilidade e disponibilidade desempenham um papel crucial no sucesso empresarial, uma vez que altos custos incentivam a busca por soluções de

engenharia para problemas de confiabilidade, com o objetivo de reduzir gastos financeiros, aumentar a confiabilidade, satisfazer os clientes com entregas pontuais através de maior disponibilidade de equipamentos e diminuir problemas e custos decorrentes de falhas. A pesquisa evidenciou que a literatura sobre confiabilidade, manutenção, manutenibilidade e disponibilidade é vasta, com uma grande quantidade de livros e artigos publicados, como apontado por Tsarouhas, Arvanitoyannis e Ampatzis (2009). Por exemplo, Sellitto (2005) discute o uso da confiabilidade e manutenibilidade na formulação de estratégias de manutenção, analisando dois casos em fábricas do setor metal-mecânico. A pesquisa utilizou técnicas de modelagem de tempos entre falhas e de reparo para estabelecer estratégias de manutenção com base na posição dos equipamentos na curva do ciclo de vida (curva da banheira). A aplicação de uma análise estratégica de manutenção indicou a manutenção preventiva como a estratégia mais adequada para a maioria das máquinas estudadas.

Mengue e Sellitto (2013) definiram a estratégia de manutenção mais adequada para uma bomba centrífuga em uma planta petrolífera, utilizando modelagem de confiabilidade e análise da posição na curva da banheira. Diedrich e Sellitto (2014) avaliaram a coerência das estratégias de manutenção aplicadas a um equipamento crítico na indústria de bebidas, utilizando a metodologia *Reliability Centered Maintenance* (RCM). Machado e Andrade (2013) aplicaram a análise de confiabilidade em diferentes equipamentos de uma empresa automotiva, identificando as estratégias de manutenção mais adequadas com base nos modos de falha observados.

Outros estudos, como o de Sellitto (2014), propuseram estratégias de manutenção para aumentar a disponibilidade de equipamentos críticos em refinarias, enquanto Mendes e Ribeiro (2014) desenvolveram um método quantitativo para revisar ou criar planos de manutenção em ambientes de produção "*just in time*". Cerveira e Sellitto (2015) definiram uma estratégia de manutenção para um forno elétrico em uma fundição de aços especiais, utilizando a metodologia RCM, destacando a fase de maturidade da curva da banheira.

Além disso, uma pesquisa específica na base *ScienceDirect* realizada em 19 de fevereiro de 2019, com as palavras-chave: *maintenance*, *industry* e *reliability*, e a sigla "RCM" no texto, considerando o período de 2009 a 2019, identificou 31 artigos. Após análise dos resumos, 30 desses artigos eram relevantes, com destaque para setores como aviação, cimento, elétrico, eólico, ferroviário, marítimo, mecânico, mineração, petróleo e gás, plantas de processos e térmico. A MCC foi frequentemente citada como uma técnica consolidada, sendo utilizada como base para novas abordagens, como a gravata borboleta, *Reliability*, *Availability*,

Maintainability and Safety (RAMS), Center for Industrial Management Maintenance Concept Development Framework (CIBOCOF), Analytical Hierarchy Process (AHP), Particle Swarm Optimization (PSO) e Reliability and Risk Centered Maintenance (RRCM).

Estudos como o de Sabouhi *et al.* (2016) mostraram como a confiabilidade pode ser usada para quantificar a criticidade de componentes em usinas de energia, enquanto Vishnu e Regikumar (2016) desenvolveram um modelo geral de RCM adequado para plantas de processos.

Selvik e Aven (2011) propôs a RCM, que prioriza incertezas e riscos em vez de probabilidades, aplicando-a na indústria *offshore*. Aziz *et al.* (2019) destacaram a aplicação da MCC em operações marítimas usando a metodologia gravata borboleta, enquanto Waeyenbergh e Pintelon, (2009) desenvolveu o modelo CIBOCOF para otimizar a manutenção em uma empresa de iluminação.

Hameed, Vatn e Heggset (2011) destacaram a importância de um banco de dados robusto para a implementação de engenharia RAMS em parques eólicos offshore, enfrentando desafios na obtenção de dados de falha devido a restrições contratuais, mas sublinhando os benefícios de tal aplicação na tomada de decisões técnicas e gerenciais.

3 METODOLOGIA

3.1 Método científico

A investigação científica envolve a organização de um pacote metodológico que deve ser cuidadosamente estruturado, a partir da escolha de métodos e técnicas alinhados ao problema e à questão de pesquisa (BERTO; NAKANO, 2014). Nesse contexto, método e técnica são complementares e inseparáveis: o método define o caminho a ser seguido, enquanto a técnica detalha o processo para se alcançar os resultados (BERTO; NAKANO, 2014).

A escolha do método é uma das decisões mais importantes no desenvolvimento de uma pesquisa, pois garante um embasamento científico adequado, permitindo a construção de trabalhos estruturados que possam ser replicados e aprimorados por outros pesquisadores (MIGUEL, 2007). Para que uma pesquisa seja considerada científica, ela deve avançar o conhecimento existente e não criar novas ideias desvinculadas do que já foi estabelecido na literatura especializada (MIGUEL *et al.*, 2012; MIGUEL, 2007).

O método científico utilizado em um estudo é crucial para explicar os fenômenos observados de maneira menos abstrata, tornando-se essencial na preparação de como o problema de pesquisa será abordado (BERTO; NAKANO, 2014). No caso deste estudo, o método histórico foi empregado, conforme Fachin (2001), para investigar fatos passados e verificar sua influência na sociedade atual. As variáveis consideradas são de ordem temporal, com a análise de dados históricos de seis safras, do período de 2012 a 2017, divididos e analisados anualmente e mensalmente. Isso visa identificar desvios persistentes e propor soluções (MARCONI; LAKATOS, 2002).

Além disso, o estudo adota uma pesquisa descritiva para observar e detalhar fenômenos ou situações, determinando um perfil por meio da análise dos tempos de reparo e dos intervalos entre falhas. Essa abordagem descritiva busca elaborar um modelo estatístico que descreva o comportamento observado (BERTO; NAKANO, 2014). Do ponto de vista metodológico, a pesquisa é quantitativa, utilizando a modelagem estatística e habilidades matemáticas para desenvolver um modelo que represente o funcionamento do sistema estudado ou parte dele (BERTO; NAKANO, 2014).

3.2 Tipos de pesquisa

Os critérios para classificar os tipos de pesquisa variam de acordo com o enfoque do autor. Marconi e Lakatos (2002) e Cervo e Bervian (2002) distinguem entre pesquisa básica e

aplicada. A pesquisa básica visa o avanço científico e a ampliação de conhecimentos teóricos, sem foco em aplicações práticas imediatas. Em contraste, a pesquisa aplicada busca soluções para problemas concretos e práticos, com resultados aplicáveis na realidade. Ambas são essenciais para o progresso da ciência, complementando-se mutuamente.

Este estudo é classificado como uma pesquisa aplicada, com foco na escolha da estratégia de manutenção mais adequada para os equipamentos da empresa estudada. Quanto ao tipo de pesquisa, ela é descritiva, pois observa e analisa o comportamento das falhas dos equipamentos, avaliando a eficácia da estratégia de manutenção em uso.

A pesquisa científica pode ser abordada de forma quantitativa ou qualitativa. A abordagem quantitativa se preocupa em eliminar subjetividades, utilizando métodos estatísticos para testar hipóteses com base em variáveis mensuráveis. Na Engenharia de Produção, as principais técnicas quantitativas incluem levantamentos (*surveys*), modelagem, simulação e experimentos.

A abordagem qualitativa, por outro lado, valoriza a perspectiva dos indivíduos e o ambiente natural em que o problema está inserido. Embora haja quantificação, a ênfase está em descrever e interpretar o entendimento dos participantes.

Neste estudo, a abordagem é quantitativa e qualitativa, utilizando a modelagem estatística para calcular a confiabilidade dos equipamentos. Segundo Berto e Nakano (2014), técnicas como levantamento, estudo de caso, modelagem, simulação e experimentos são comuns em pesquisas na Engenharia de Produção. A modelagem, neste contexto, é utilizada para compreender principalmente como os tempos médios de reparo (MTTR) se distribuem permitindo o cálculo da confiabilidade dos equipamentos. Vamos avaliar também como os tempos médios entre falha (MTBF) podem contribuir como uma informação valiosa na estratégia de manutenção.

3.3 Procedimentos operacionais

Esta dissertação foi desenvolvida seguindo um processo estruturado em nove passos, cada um direcionado a uma etapa específica da pesquisa.

Passo 1: realizou-se um estudo teórico sobre manutenção, abordando sua evolução, diferentes técnicas e tipos. Também foram analisados conceitos de confiabilidade, incluindo funções, modelos quantitativos e paramétricos.

Passo 2: caracterizou-se a empresa e foram coletados dados ao longo de um período de 5 anos. Esses dados incluem tempos de reparo de diversos equipamentos da unidade industrial, fundamentais para a análise da interrupção do processo produtivo. Os dados coletados para a análise estatística consistem em 1.410 registros de falhas de duas moendas que trabalham em paralelo (697 tempos de reparos para moenda A e 713 tempos de reparos para moenda B) entre 2019 até 2023. Esses registros contêm os tempos de duração de reparos em minutos.

Passo 3: realizou-se uma análise estatística preliminar dos dados coletados, preparando-os para a modelagem da confiabilidade.

Passo 4: foram conduzidos testes de aderência para determinar a distribuição de probabilidade que melhor descreve os dados da amostra.

Passo 5: utilizando os modelos Log-Normal os tempos de reparo (MTTR), além de calcular as estatísticas descritivas, como média, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação. Nesta etapa, também foi verificado o impacto da frequência de reparos, avaliando os tempos médios entre falha (MTBF)

Passo 6: a função de confiabilidade e as taxas de falha foram modeladas utilizando o modelo Log-Normal para os tempos médio de reparo (MTTR), ambos acompanhados de análise estatística descritiva para cada moenda.

Passo 7: os resultados obtidos foram analisados para entender o comportamento entre os meses, turnos, código de causas e anos. A evolução anual e mensal da manutenção foi também avaliada, considerando esses parâmetros no ciclo de vida da curva da banheira.

Passo 8: compararam-se os resultados da modelagem e análise de confiabilidade (estratégia atual) com as estratégias recomendadas na literatura.

Passo 9: foram elaboradas as conclusões com base nos achados de toda a pesquisa.

4 RESULTADOS

4.1 Modelagem estatística da confiabilidade

4.1.1 Caracterização da Empresa

A empresa objeto deste estudo opera no setor sucroalcooleiro, com foco na produção de açúcar, etanol e geração de energia elétrica. Localizada no interior do Estado de São Paulo, Brasil, foi estabelecida na década de 1950, em conjunto com uma colônia que abriga os funcionários atuantes nos setores agrícola e industrial. Durante os anos 1990, a empresa integrou um grande conglomerado de usinas e, atualmente, é parte de uma *joint venture* entre uma empresa nacional e uma estrangeira. Ao longo do tempo, passou por diversas reformas e expansões. Suas instalações fabris têm uma capacidade diária de moagem de cana-de-açúcar de 28 mil toneladas, resultando na produção de 55 mil sacas de açúcar, 930 mil litros de etanol e na geração de 111 MW (MegaWatt) de energia elétrica.

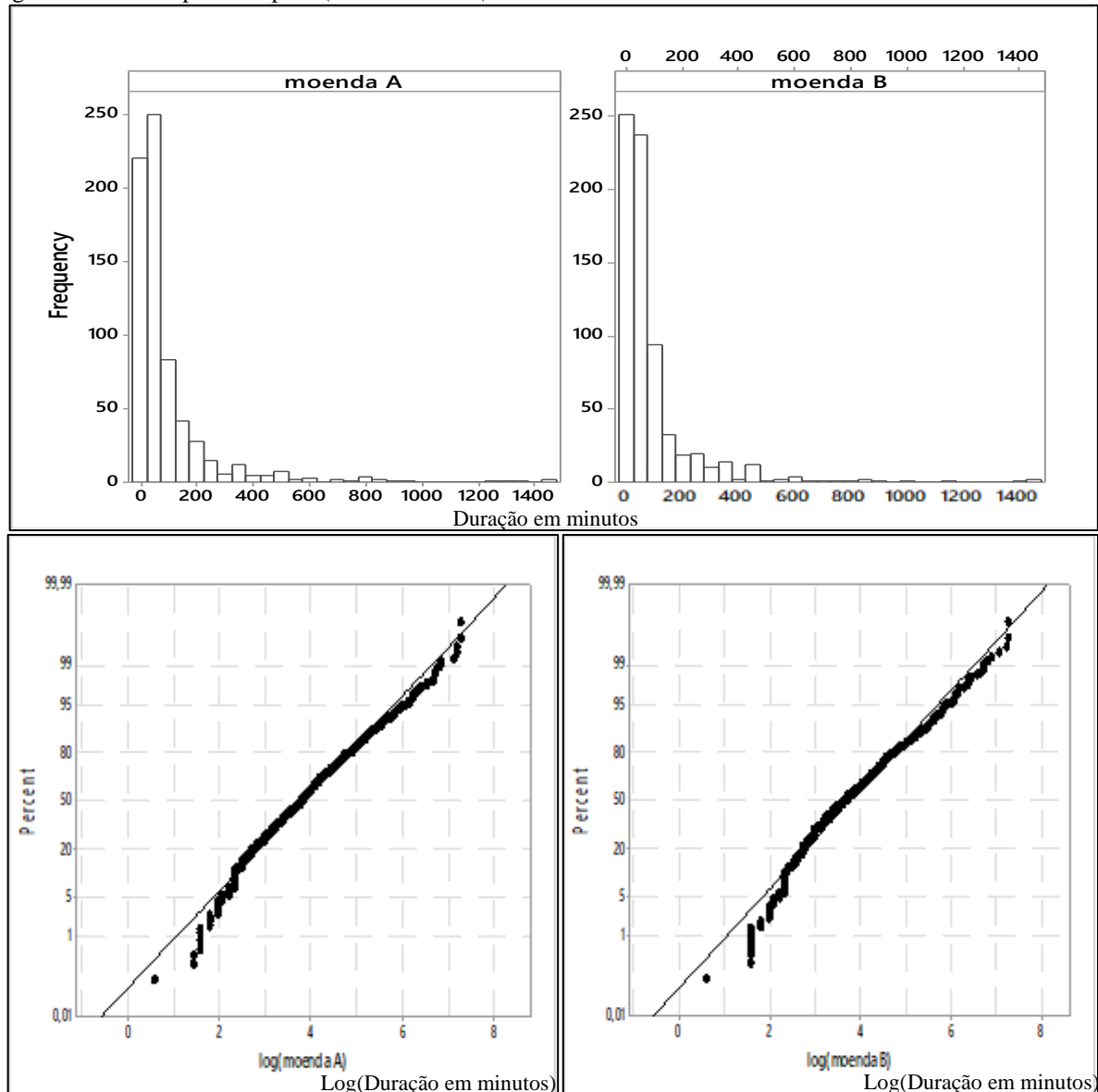
A empresa, seguindo a tradição do setor sucroalcooleiro, opera de forma sazonal em dois períodos do ano conhecidos como safra e entressafra. No período de entressafra, que ocorre entre dezembro e o final de março, a operação da indústria é completamente interrompida, tornando-se disponível para manutenção conforme planejamento e orçamento previamente estabelecidos.

O período de safra ocorre de abril a novembro, quando a fábrica opera de forma contínua e semelhante a uma empresa de bens de consumo. A política de manutenção da empresa durante esse período envolve um reparo programado mensal de seis horas, a menos que ocorra chuva, o que inviabiliza o corte da cana. Nesse caso, a duração do reparo é indefinida e pode se estender por vários dias, dependendo das condições climáticas. Portanto, as paradas programadas e as paradas por chuva, não são contabilizadas como (MTTR). O reinício das operações industriais só ocorre após a retomada das atividades agrícolas, que incluem o corte, o carregamento e o transporte da cana-de-açúcar para a indústria.

A Figura 11 mostra os histogramas dos tempos de reparos (duração) em minutos na escala original para as duas moendas A e B. Os dados coletados para a análise estatística consistem em 1.410 registros de falhas de duas moendas (697 tempos de reparos em minutos para moenda A e 713 tempos de reparos em minutos para moenda B) entre 2019 até 2023. Esses registros contêm os tempos de duração de reparos em minutos. A Figura 10 também mostra os gráficos de probabilidade normal para os dados transformados para a escala logarítmica para as duas moendas, de onde observa-se bom ajuste da distribuição normal aos dados na escala

logarítmica. Na Figura 11 observa-se grande assimetria dos histogramas para os dados de reparos para as duas moendas o que leva a necessidade de ajustar alguma distribuição de probabilidade assimétrica aos dados como por exemplo, uma distribuição Weibull ou uma distribuição log-normal, duas distribuições de probabilidade muito usadas sob o enfoque de confiabilidade. A partir de uma transformação logarítmica dos tempos de reparo observa-se boa normalidade para os dados transformados (pontos próximos da reta considerando um gráfico de probabilidade normal). Desta forma, conclui-se que um modelo de confiabilidade (probabilidade) lognormal, pode ser utilizado neste estudo para os dados de MTTR, como descrito nos próximos capítulos.

Figura 11 - Histogramas dos tempos de reparo na escala original e gráficos de probabilidade normal para os logaritmos dos tempos de reparo (moendas A e B).



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

4.2 ANOVA

Nesta seção apresenta-se algumas técnicas estatísticas para analisar os dados de reparos relacionados às duas moendas. Para isso, inicialmente são considerados modelos de ANOVA com uma classificação com os dados transformados para a escala logarítmica para comparar as médias dos tempos de reparos nos diferentes níveis de cada fator assumido. Também são considerados modelos de confiabilidade para analisar os dados na escala original assumindo uma distribuição log-normal para os dados.

Para uma primeira análise estatística dos tempos de reparo da indústria de etanol assumindo os dados transformados em escala logarítmica, utiliza-se métodos de Análise de Variância (ANOVA) para comparar os dados de diferentes grupos ou fatores que afetam os tempos (duração) dos reparos. A análise de variância é, de forma simplificada, uma coleção de modelos estatísticos nos quais a variância observada em uma variável de resposta é particionada em componentes atribuíveis a diferentes fontes de variação. Dessa forma, a ANOVA fornece um teste estatístico para saber se as médias de vários grupos são iguais ou não, ou seja, uma generalização dos testes t de *Student* para mais de dois grupos (MONTGOMERY; RUNGER, 2010). Utilizando um modelo de ANOVA com apenas uma classificação, a hipótese nula estabelece que todos os grupos são simplesmente amostras aleatórias da mesma população. A rejeição da hipótese nula implica que diferentes tratamentos ou grupos têm médias diferentes. A análise estatística com um modelo de ANOVA assume independência, normalidade e homogeneidade das variâncias dos resíduos.

4.2.1 Definição da amostra

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas (medias, desvios-padrões, variâncias e medianas amostrais) dos tempos de duração dos reparos para cada uma das duas moendas (moenda A e moenda B) com os dados na escala original.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas (Moenda (A) e Moenda (B)).

Variável	N (Eventos)	Média (min)	D.P. (min)	Variância (min)	Mediana (min)
Moenda A	697	100,53	173,06	29949,74	45,00
Moenda B	713	93,06	159,81	25538,23	37,80

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Para comparar as médias de duração de reparos das duas moendas, usamos um teste de hipóteses t de *Student* com $n = n_1 + n_2 - 2 = 1408$ graus de liberdade (DF) onde $n_1 = 697$ (moenda A) e $n_2 = 713$ (moenda B) para verificar a igualdade das duas medias de duração de reparos para as duas moendas (dados na escala logarítmica). O teste t de *Student* assume normalidade dos dados (ver Figura 11). Usando o *software* Minitab[®], concluímos que as medias (duração de reparos) para as duas moendas são estatisticamente iguais (valor-p = 0,293 > 0,05). Um intervalo de confiança 95% para a diferença de medias dado por (-0,0570; 0,1889) contém o valor zero confirmando que não há diferença estatística entre medias.

Assumindo um modelo de confiabilidade com a distribuição log-normal (1) para os tempos de reparo para manutenção com os dados na escala original, os estimadores de máxima verossimilhança ou EMV (uso do *software* Minitab[®]) para os parâmetros μ e σ^2 e para o tempo médio de reparo μ_T (MTTR - *Mean Time To Repair*) são dados na Tabela 2 para os vários níveis do fator causa (em parênteses são dados os erros-padrões dos EMV).

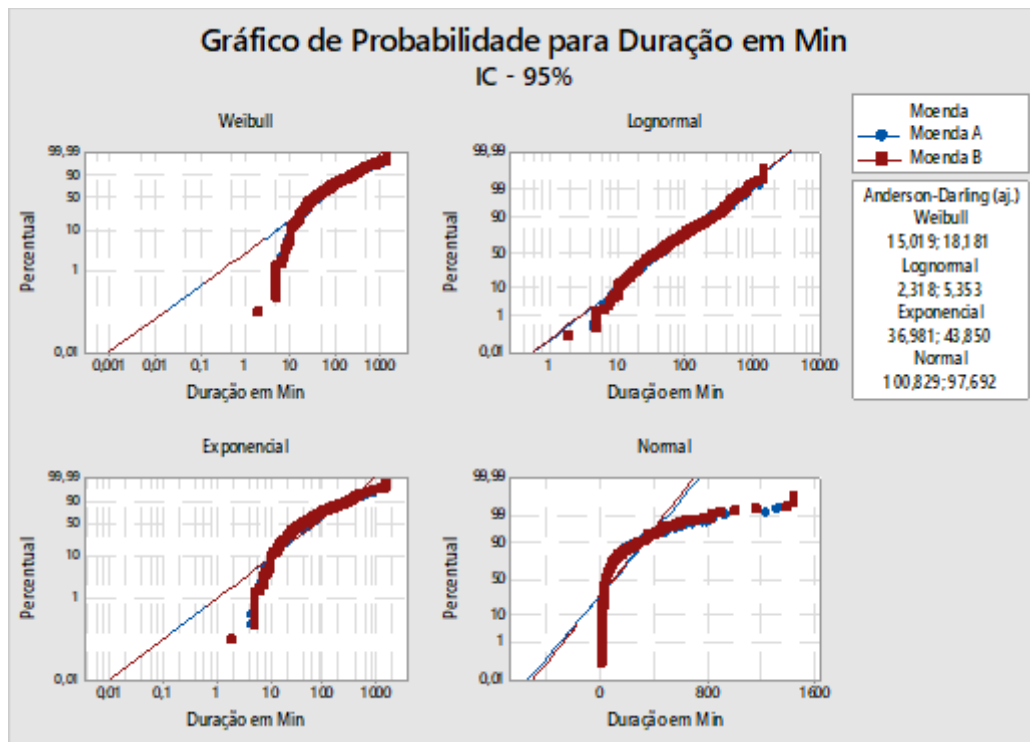
Tabela 2 - EMV para os parâmetros da distribuição log-normal (duas moendas).

	μ	σ^2	μ_T (min)
Moenda A	3,8402(0,04492)	1,1859(0,0318)	94,0152(5,5116)
Moenda B	3,7743(0,04362)	1,1648(0,0308)	85,8558(4,85198)

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Foram avaliados os principais modelos de probabilidade, como: Weibull, Lognormal, Exponencial e Normal, para as amostras da extração 1 (moenda A) e extração 2 (moenda B), sendo o modelo log-normal, o mais adequado para este estudo de caso, conforme observado na Figura 12.

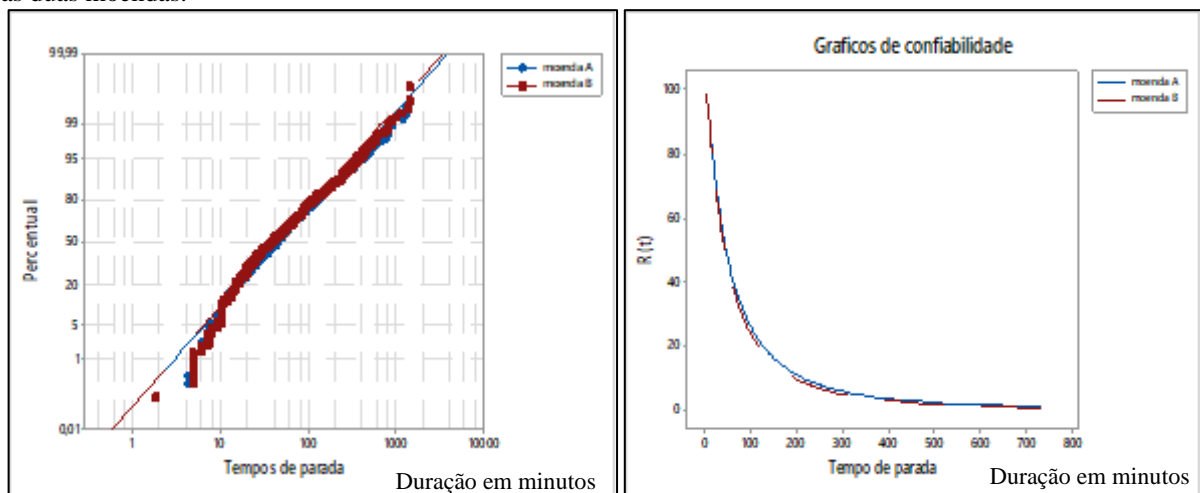
Figura 12 - Avaliação dos modelos de probabilidade estudados.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Apesar da distribuição de Weibull ser a mais utilizada em modelos de confiabilidade, percebemos o modelo não foi o mais adequado, principalmente nos primeiros percentis. A Figura 13 mostra os gráficos de probabilidade log-normal associados com as duas moendas e os gráficos das funções de confiabilidade $R(t) = P(T > t)$, onde $P(\cdot)$ denota probabilidade de um evento, para diferentes valores de t .

Figura 13 - Gráficos de probabilidade log-normal e gráficos das funções de confiabilidade $R(t)$ associados com as duas moendas.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Dos gráficos da Figura 13, observa-se bom ajuste dos dados de reparos com os dados das duas moendas para a distribuição log-normal (pontos próximos das retas no gráfico de probabilidade log-normal). Também observa-se que as funções de confiabilidade $R(t) = P(T > t)$ com diferentes valores para t são aproximadamente iguais para as duas moendas. Com esses resultados podemos concluir que as duas moendas são similares (medias de reparos iguais) e mesmo comportamento para as durações dos tempos de reparos.

A seguir apresentamos as análises estatísticas dos tempos de reparos individualmente para cada moenda A e B na presença de vários fatores.

4.2.2 Tempos de manutenção da Moenda A

Consideramos a seguir as análises estatísticas dos tempos de manutenção associados a diversos fatores.

(a) Causas

A Tabela 3 apresenta as estatísticas descritivas dos tempos de duração dos reparos para cada nível do fator causa. Na análise estatística dos dados assumimos os seguintes níveis para o fator causa que podem estar associados com as falhas: Manutenção Elétrica (ELET); Excesso de capacidade de moagem - excesso de processamento (EXCM); Extração e moagem (EXTR); Fábrica de açúcar (FABR); Geração de Vapor (GVAP); Instrumentação (INST) e Manutenção Mecânica (MECN).

Tabela 3 - Estatísticas descritivas associadas aos níveis do fator causa (MTTR e MTBF em minutos).

Variável	Causa	N	Média (MTTR)	D.P.	Variância	Mediana	(MTBF)
Duração (Min)	ELET	97	61,9	108,5	11763,1	28,2	2491,5
	EXCM	23	142,3	205,8	42339,1	51	10626,4
	EXTR	250	91,24	137,8	18988,05	41,4	899,5
	FABR	106	69,79	76,71	5885,13	49,8	2266,8
	GVAP	53	119,1	150,3	22580	52,2	4554,1
	INST	50	47,83	51,52	2653,99	30	4905,8
	MECN	104	202,9	319,6	102155,8	74,4	2178,6

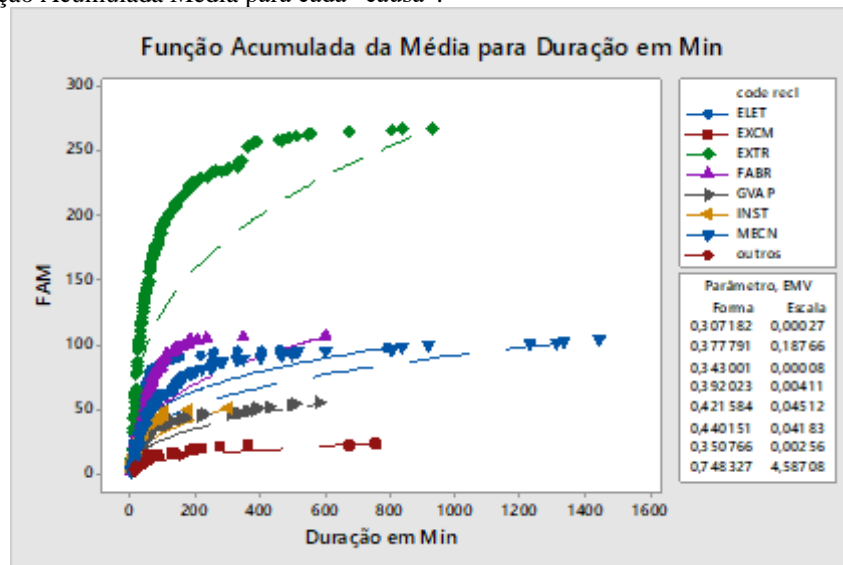
Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Dos resultados da Tabela 3, observa-se que o maior tempo médio de reparo (MTTR) é dado para MECN (202,9 minutos) seguido por EXCM (142,3 minutos). A partir de um modelo de ANOVA aplicado aos dados transformados ($\log(\text{duração})$), observa-se que as medias dos tempos de reparo são estatisticamente diferentes ($\text{valor-p} < 0,05$). Como a hipótese de

nulidade (medias iguais) foi rejeitada, usamos procedimentos usuais de comparações múltiplas dados pelo *software* Minitab® (método de Tukey ou método de Fisher) para construir intervalos de confiança 95% para as diferenças de medias encontrando as seguintes diferenças significativas: médias diferentes entre MECN e ELETR, MECN e EXTR, MECN e FABR e MECN e INST (os intervalos de confiança 95% para as diferenças de medias não contém o valor zero).

Para os dados observados na Tabela 3, é importante considerar a frequência de eventos para EXTR, onde o número de eventos destoa em relação aos demais, $N = 250$ eventos. Desta forma, é imprescindível realizar a análise do MTBF, que consequentemente, resultou em um tempo menor. Como observado na Figura 14, Gráfico Função Acumulada da Média em minutos, podemos concluir que a causa EXTR também deve ser considerada na estratégia de manutenção da empresa como um dos principais ofensores.

Figura 14 - Função Acumulada Média para cada “causa”.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Assumindo um modelo de confiabilidade com a distribuição log-normal (1) para os dados na escala original, os estimadores de máxima verossimilhança ou EMV (uso do *software* Minitab®) para os parâmetros μ e σ^2 e para o tempo médio de reparo μ_T (MTTR - *Mean Time To Repair*) são dados na Tabela 4 para os vários níveis do fator causa (em parênteses são dados os erros-padrões dos EMV).

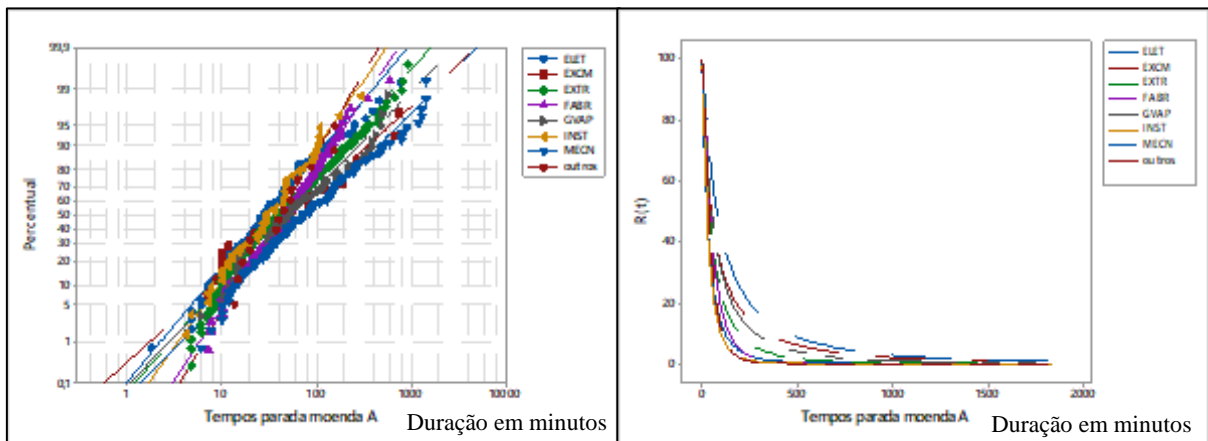
Tabela 4 - EMV para os parâmetros da distribuição log-normal (fator causa).

Nível do fator	μ	σ^2	μ_T (min)
ELET	3,4153(0,1128)	1,1111(0,0798)	56,4101(8,09324)
EXCM	3,9795(0,3063)	1,4691(0,2166)	157,3660(69,5072)
EXTR	3,7958(0,07378)	1,1666(0,0522)	87,9041(8,4074)
FABR	3,8510(0,0866)	0,8915(0,0612)	69,9985(7,1655)
GVAP	4,0141(0,1754)	1,2767(0,1240)	125,1050(29,5584)
INST	3,4418(0,1326)	0,9376(0,0937)	48,4881(7,71384)
MECN	4,4215(0,1304)	1,3306(0,0922)	201,6840(36,1303)
Outros	3,7135(0,2093)	0,7833(0,1480)	55,7203(13,3352)

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A Figura 15 mostra os gráficos de probabilidade da distribuição log-normal associados com as duas moedas e os gráficos da função de confiabilidade $R(t)$. Observa-se que as probabilidades $R(t) = P(T > t)$ com diferentes valores para t são maiores para MECN, confirmando que os tempos de reparos são maiores com a causa MECN.

Figura 15 - Gráficos de probabilidade log-normal associados aos níveis do fator causa e gráficos de confiabilidade $R(t)$ em cada nível do fator causa



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

(b) Turnos

A Tabela 5 apresenta as estatísticas descritivas dos tempos de duração dos reparos para cada turno.

Tabela 5 - Estatísticas descritivas associadas aos turnos.

Variável	Turno	N (Eventos)	Média (Min)	D.P. (Min)	Variância (Min) ²	Mediana (Min)
Duração (Min)	Turno A	207	95,53	134,09	17981,08	46,20
	Turno B	220	74,16	92,17	8495,84	41,40
	Turno C	270	125,9	235,7	55572,4	45,00

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Dos resultados da Tabela 5, observa-se que o maior tempo médio de reparo é dado para turno C (125,9 minutos), apesar da existência de grande variabilidade. Considerando os dados transformados ($\log(\text{duração})$), observa-se que as medias dos tempos de reparo (uso de um modelo de ANOVA) não são estatisticamente diferentes entre turnos ($\text{valor-p} = 0,145 > 0,05$). Como não rejeitamos a hipótese de nulidade assumindo um modelo de ANOVA para os dados transformados, não consideramos uma análise estatística baseada na distribuição log-normal para os dados na escala original.

(c) Meses

A Tabela 6 apresenta as estatísticas descritivas dos tempos de duração dos reparos para cada mês.

Tabela 6 - Estatísticas descritivas associadas aos meses.

Variável	Mês	N (Eventos)	Média (Min)	D.P. (Min)	Variância (Min) ²	Mediana (Min)
Duração (Min)	4	93	105,6	133,7	17873,9	55,8
	5	114	96,7	158,0	24954,8	37,2
	6	74	141,6	256,4	65732,9	54,0
	7	144	83,0	146,7	21508,7	40,8
	8	102	73,1	103,5	10721,0	36,6
	9	96	87,1	164,3	27010,3	33,0
	10	51	81,7	93,2	8679,3	52,8
	11	23	295,9	385,0	148192,3	142,8

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

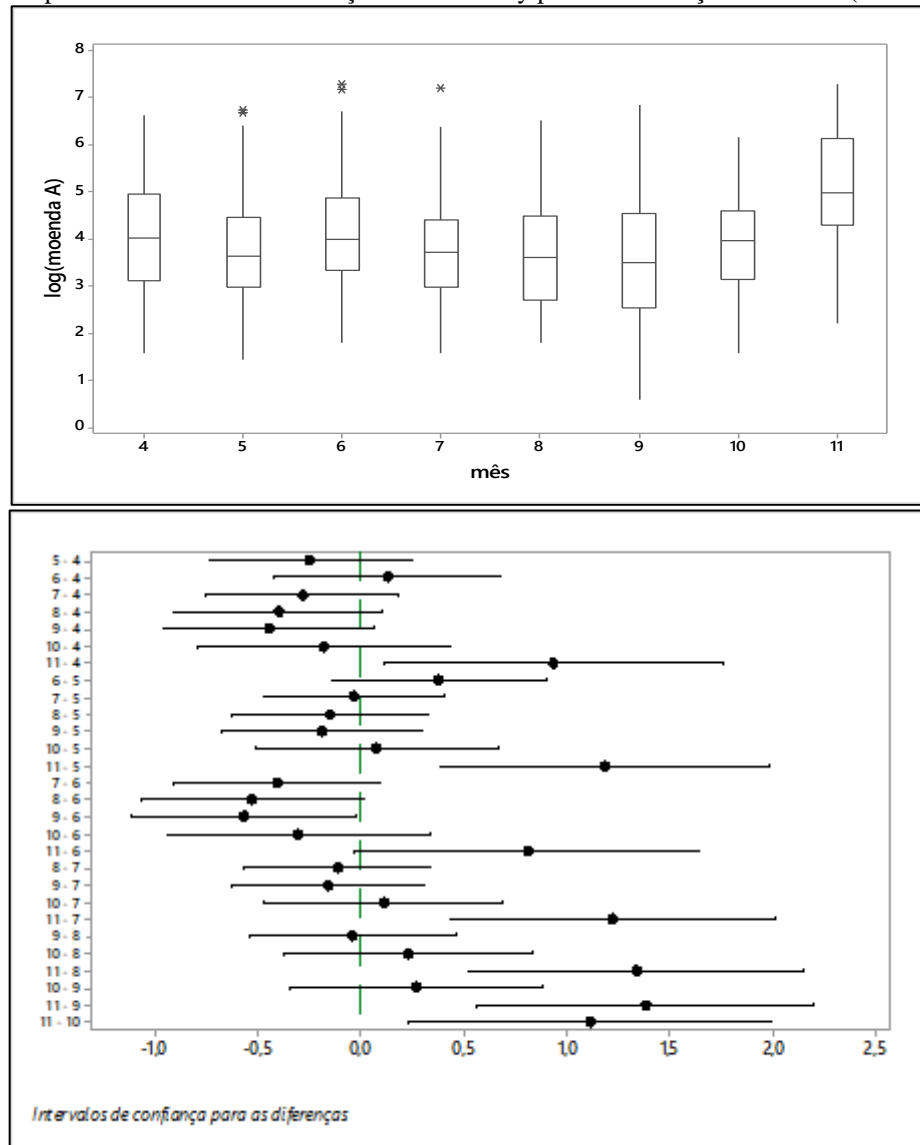
Dos resultados da Tabela 6, observa-se que o maior tempo médio de reparo é dado para o mês 11 (novembro) com 295,9 minutos. Considerando os dados transformados

(log(duração)), observa-se medias de reparos diferentes (ANOVA) entre meses (valor- $p < 0,05$). A partir de técnicas de comparações múltiplas de Tukey (e Fisher), observa-se médias diferentes entre os pares de meses, MÊS 11 - MÊS 4, MÊS 11 - MÊS 5, MÊS 11 - MÊS 6, MÊS 11 - MÊS 7, MÊS 11 - MÊS 8, MÊS 11 - MÊS 9 (ver Figura 16).

Na Figura 16 também são dados os Box-plots para os dados de duração de reparos para os 8 meses.

Os EMV para as medias dos tempo de reparos μ_T (MTTR - Mean Time To Repair) para cada mês (4, 5, 6,...,10, 11), assumindo a distribuição log-normal (1) e considerando os dados na escala original são dadas, respectivamente, por: 108,8450(16,6910); 87,3927(12,5277); 125,7750(22,0818); 75,0837(8,41582); 70,8191(10,0914); 79,9110(13,8066); 86,6941(17,0443) e 317,5410(112,3200). Isso confirma que o mês 11 (novembro) tem maior tempo médio de reparos com um erro-padrão muito grande (112,320).

Figura 16 - Box-plots e intervalos de confiança 95% de Tukey para as diferenças de medias (meses)



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

(d) Grupo Denominação - D (Estratificação do grupo Causas)

A Tabela 7 apresenta as estatísticas descritivas dos tempos de duração dos para cada nível de grupo (D), que são os dados estratificados, com os dados na escala original. Dos resultados da Tabela 7, observa-se que os maiores tempos médios de reparo para manutenção são dados para excesso de capacidade de moagem (198,0), acionamento da moenda (153,6) e rampa de moagem (150,4). Considerando os dados transformados ($\log(\text{duração})$), observa-se que as medias dos tempos de reparo (uso de um modelo de ANOVA) são estatisticamente diferentes ($\text{valor-p} < 0,05$).

Tabela 7 - Estatísticas descritivas associadas aos níveis de grupo.

Variável	Denominação	N (Eventos)	Média (Min)	D.P. (Min)	Variância (Min)^2	Mediana (Min)
Duração (Min)	Acionamento da moenda	52	153,6	281,1	78992,4	50,4
	Alimentação do sistema d	36	146,1	221,5	49060,6	55,5
	Armazenagem de açúcar	5	97,6	94,6	8956,9	64,2
	Embebição	39	57,2	74,6	5567,1	39,0
	Esteira Intermediária	44	35,02	36,51	1332,87	22,50
	Excesso Capacidade de Mo	3	198,0	270,0	72750,0	60,0
	Fabricação de açúcar	78	92,9	150,0	22513,3	48,0
	Falta de cana - transpor	1	52,800	*	*	52,800
	Geração de energia	20	108,8	111,9	12519,0	64,8
	Geração de vapor	41	93,1	116,1	13480,3	45,0
	Movimentação de bagaço	71	88,8	126,8	16084,5	33,0
	Outro	1	25,200	*	*	25,200
	Preparo de cana	135	138,3	246,5	60760,6	51,0
	Rampa de Moagem	24	150,4	205,1	42061,1	53,4
	Recepção de cana	15	40,7	64,6	4177,7	15,0
	Terno de moenda	36	72,8	78,0	6080,9	41,4
	Tratamento de caldo	91	70,71	86,06	7405,94	45,00
	Utilidades	5	79,8	50,5	2547,5	82,2

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Os EMV para as médias dos tempos de reparos μ_T para cada nível de grupo assumindo a distribuição log-normal (1) e considerando os dados na escala original são dadas na Tabela 8, também mostrando que o excesso de capacidade de moagem (198,0 minutos) tem maior tempo médio de manutenção.

Tabela 8 - EMV para as medias dos tempos de reparos μ_T associadas aos níveis de grupo.

Variável	Denominação	N (Eventos)	μ_T (Min)	Erro padrão (Min)
Log(duração)	Acionamento da moenda	52	145,219	38,1994
	Alimentação do sistema ext.	36	151,418	50,5705
	Armazenagem de açúcar	5	97,9767	42,8760
	Embebição	39	53,8245	7,7705
	Esteira Intermediária	44	34,0198	5,0327
	Excesso Capacidade de Moag.	3	203,400	198,827
	Fabricação de açúcar	78	84,6704	12,3305

Geração de energia	20	116,838	36,1803
Geração de vapor	41	99,7801	25,3623
Movimentação de bagaço	71	84,9759	15,8691
Preparo de cana	135	126,561	17,9712
Rampa de Moagem	24	173,748	76,3133
Recepção de cana	15	37,5990	15,0610
Terno de moenda	36	76,9053	17,8208
Tratamento de caldo	91	71,4255	9,4350
Utilidades	5	84,2562	31,5397

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

4.2.3 Tempos de manutenção da Moenda B

(a) Causa

A Tabela 9 apresenta as estatísticas descritivas dos tempos de duração dos reparos para cada nível do fator causa de onde se observa que o maior tempo médio de reparo é dado para EXCM com tempo médio de manutenção dado por 313,5 minutos.

Tabela 9 - Estatísticas descritivas associadas aos níveis do fator causa. (MTTR e MTBF em minutos)

Variável	Causa	N	Média (MTTR)	D.P.	Variância	Mediana	(MTBF)
Duração(Min)	AJT	5,0	72,0	56,2	3157,7	64,8	49464,0
	ELET	83,0	63,2	101,3	10263,1	25,2	2920,9
	EXCM	11,0	313,5	311,0	96699,3	255,0	22202,9
	EXTR	319,0	98,4	198,2	39286,5	34,2	678,0
	FABR	68,0	89,9	111,5	12440,5	55,5	3552,5
	GVAP	57,0	94,0	111,0	12324,2	40,2	4251,3
	INST	61,0	42,9	52,7	2773,9	19,8	4017,4
	MECN	96,0	114,2	118,0	13935,6	74,4	2465,8
	Outro	13,0	65,5	48,0	2304,8	67,8	18986,8

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A Figura 17 mostra os Box-plots associados aos níveis do fator causa considerando os dados transformados para a escala logarítmica e intervalos de confiança 95% de Fisher para as diferenças de medias (causas) de onde pode-se descobrir as diferenças significativas entre medias (intervalos de confiança para as diferenças de medias que não contém o valor zero). A partir de um modelo de ANOVA aplicado aos dados transformados ($\log(\text{duração})$), observa-se que as medias dos tempos de reparo são estatisticamente diferentes ($\text{valor-p} < 0,05$).

Assumindo um modelo de confiabilidade com a distribuição log-normal (1) para os dados na escala original, os estimadores de máxima verossimilhança para a média μ_T , *Mean*

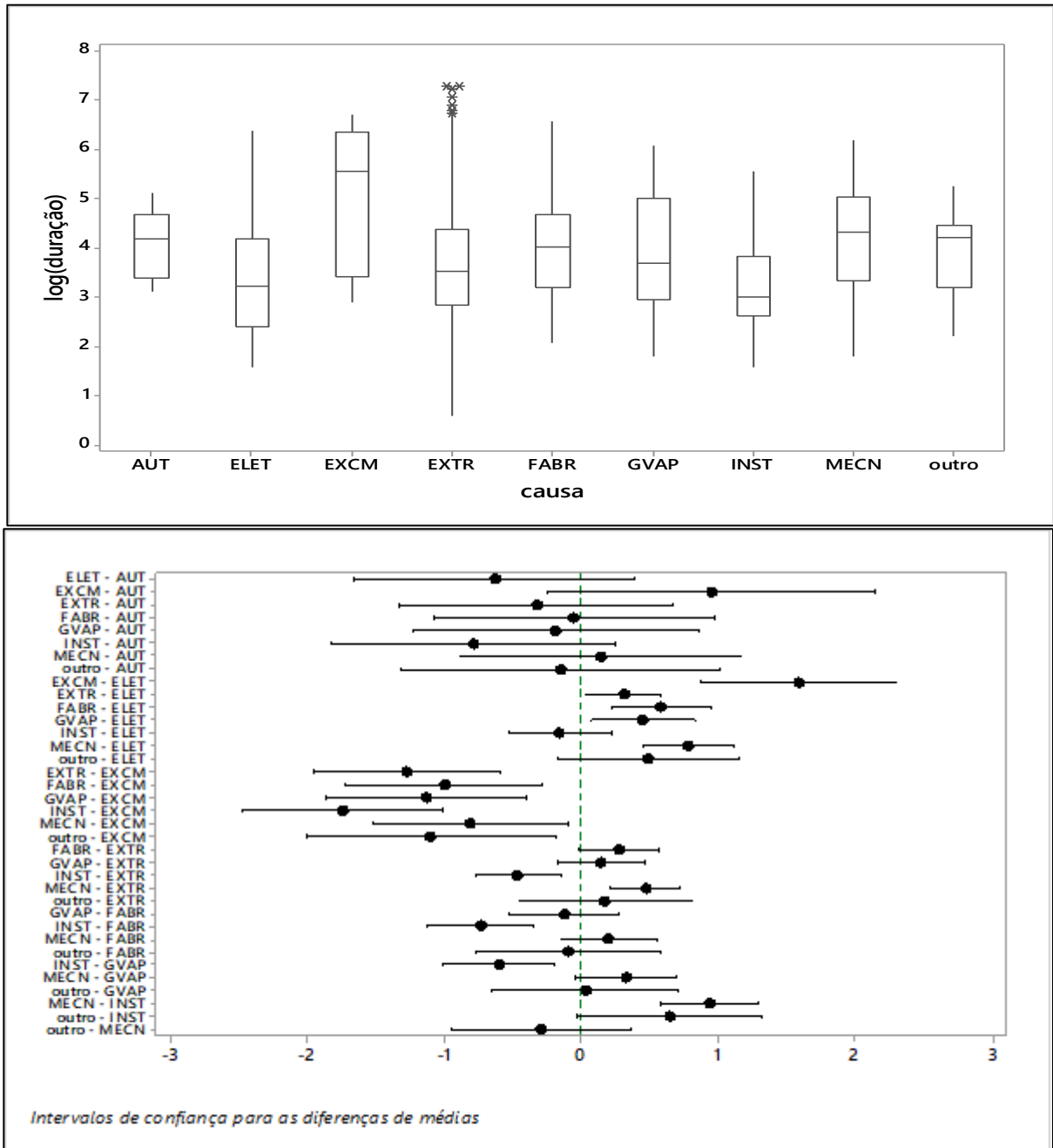
Time To Repair (MTTR) são dados na Tabela 10 para os vários níveis do fator causa. O maior tempo médio de reparo é confirmado para a causa EXCM e logo em seguida, temos a causa MECN. Os dois maiores ofensores para MTTR são os mesmos da MOENDA A, porém em ordem diferente.

Tabela 10 - EMV para os parâmetros da distribuição log-normal (fator causa).

Nível do fator	μ	σ^2	μT (min)
AUT	4,0519(0,2986)	0,6677(0,2111)	71,8667(23,7323)
ELET	3,4159(0,1248)	1,1373(0,0883)	58,1313(9,3125)
EXCM	5,0005(0,4251)	1,4099(0,3006)	401,1960(240,8320)
EXTR	3,7253(0,0659)	1,1772(0,0466)	82,9462(7,1129)
FABR	3,9976(0,1200)	0,9901(0,0849)	88,9176(13,0320)
GVAP	3,8659(0,1574)	1,1885(0,1113)	96,7549(19,8949)
INST	3,2568(0,1210)	0,9455(0,0856)	40,6043(5,9131)
MECN	4,1915(0,1131)	1,1080(0,0799)	122,1700(17,5516)
Outros	3,8962(0,2287)	0,8245(0,1617)	69,1431(18,3036)

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

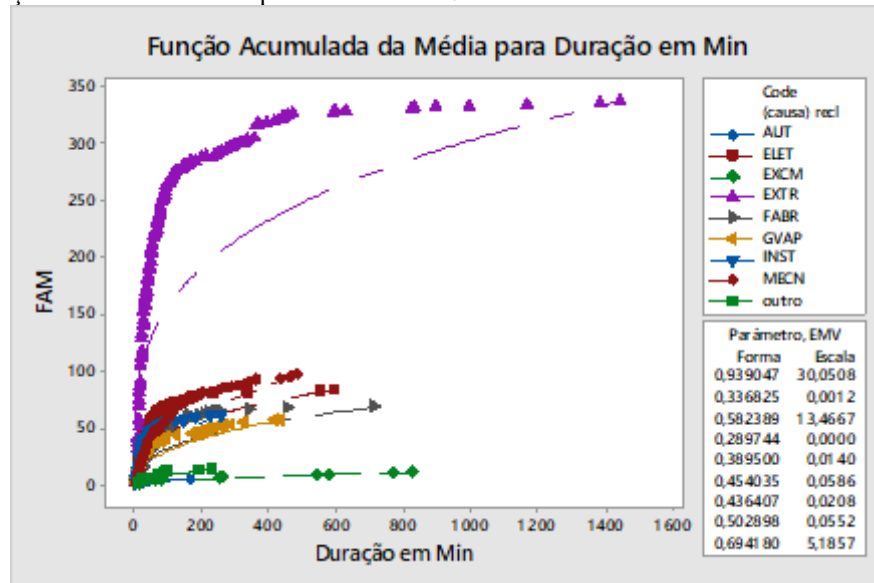
Figura 17 - Box-plots e intervalos de confiança 95% de Tukey para as diferenças de medias (meses).



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Para os dados observados na Tabela 9, é importante considerar a frequência de eventos para EXTR, onde o número de eventos destoa em relação aos demais, $N = 319$ eventos. Desta forma, é imprescindível realizar a análise do MTBF, que conseqüentemente, resultou em um tempo menor. Como observado na Figura 18, Gráfico Função Acumulada da Média em minutos, podemos concluir que a causa EXTR também deve ser considerada na estratégia de manutenção da empresa como um dos principais ofensores.

Figura 18 - Função Acumulada Média para cada “causa”.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

(b) Turnos

A Tabela 11 apresenta as estatísticas descritivas dos tempos de duração dos reparos para cada turno.

Tabela 11 - Estatísticas descritivas associadas aos turnos.

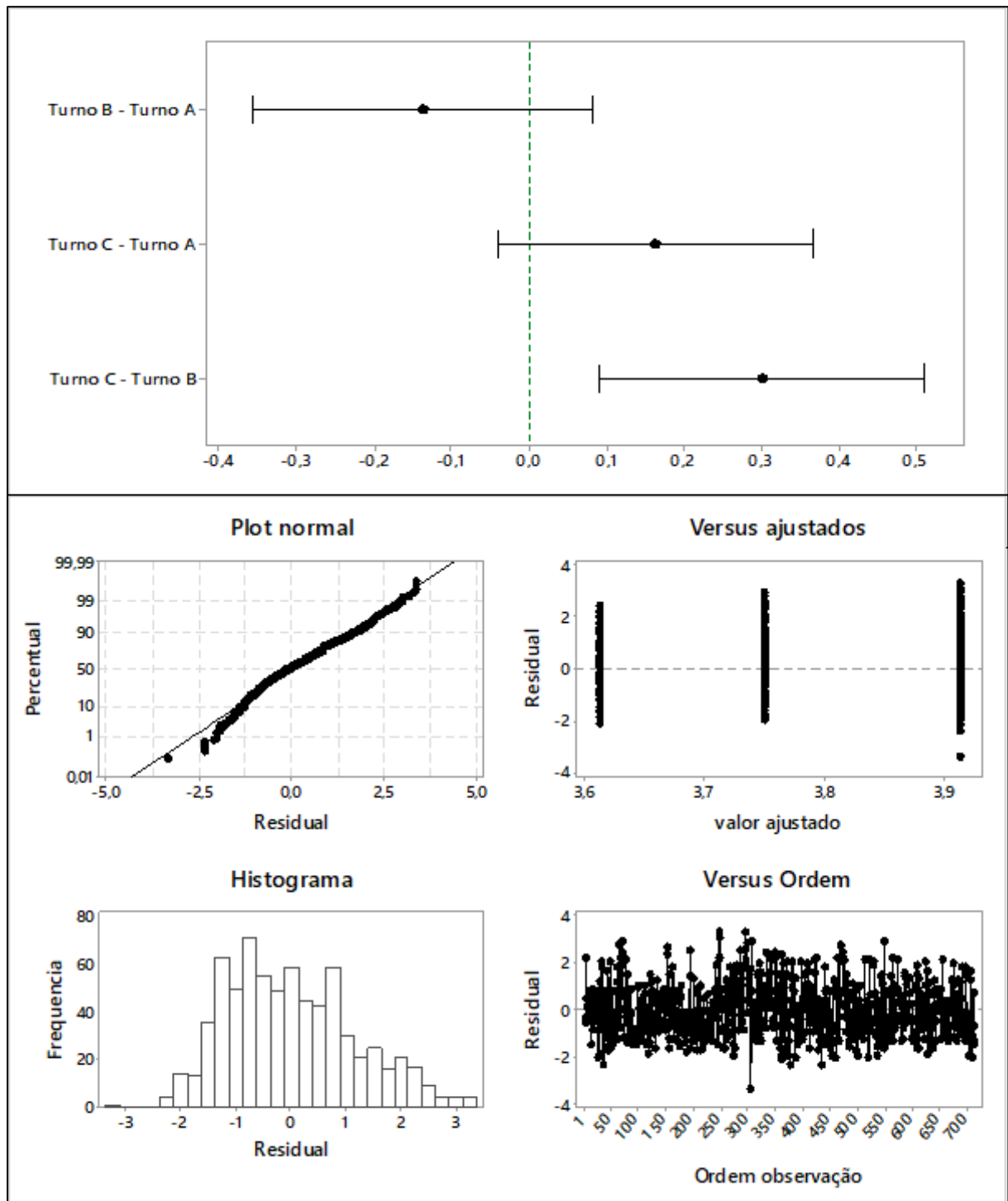
Variável	Turno	N (Eventos)	Média (Min)	D.P. (Min)	Variância (Min) ²	Mediana (Min)
Duração (Min)	Turno A	225	83,44	127,61	16283,63	39,00
	Turno B	206	67,72	84,05	7063,68	33,60
	Turno C	282	119,3	212,9	45341,4	42,0

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Dos resultados da Tabela 11, observa-se que o maior tempo médio de reparo é dado para turno C (119,3 minutos) um resultado similar ao obtido para a moenda A.

Considerando os dados transformados ($\log(\text{duração})$), observa-se que as medias dos tempos de reparo (uso de um modelo de ANOVA) são estatisticamente diferentes entre turnos (valor-p = 0,017 < 0,05). Pelos gráficos de resíduos dados na Figura 19, observa-se que as suposições necessárias para ANOVA são verificadas. Observa-se medias diferentes para Turno C e Turno B pois o intervalo de confiança 95% para a diferenças de medias para os tempos de reparo (Turno C – Turno B) não contém o valor zero (ver Figura 19).

Figura 19 - Intervalos de confiança 95% de Tukey para as diferenças de médias (turnos) e gráficos dos resíduos.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Os EMV para os tempos médios de reparos μ_T , *Mean Time To Repair* (MTTR) para cada turno assumindo a distribuição log-normal (1) e considerando os dados na escala original são dadas, respectivamente, por: 77,7993 (7,2243) para turno A; 66,6548 (6,3450) para turno

B e 109,5870 (10,9138) para turno C. Isso confirma que o turno C tem maior tempo médio de reparos.

(c) Meses

A Tabela 12 apresenta as estatísticas descritivas dos tempos de duração dos reparos para cada mês. Dos resultados da Tabela 12, observa-se que os maiores tempos médios de reparo são dados para o mês 11 (novembro), um resultado similar ao obtido com os dados da Moenda A.

Tabela 12 - Estatísticas descritivas associadas aos meses;

Variável	Mês	N (Eventos)	Média (Min)	D.P. (Min)	Variância (Min) ²	Mediana (Min)
Duração (Min)	4	119	120,3	173,3	30031,2	52,2
	5	105	103,3	204,2	41678,9	37,2
	6	73	69,28	71,09	5054,04	43,20
	7	131	65,35	80,44	6470,19	30,00
	8	112	77,5	124,1	15405,9	28,5
	9	104	86,3	121,3	14718,8	40,2
	10	52	85,8	149,9	22467,2	38,1
	11	17	321,0	472,0	223192,0	75,0

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

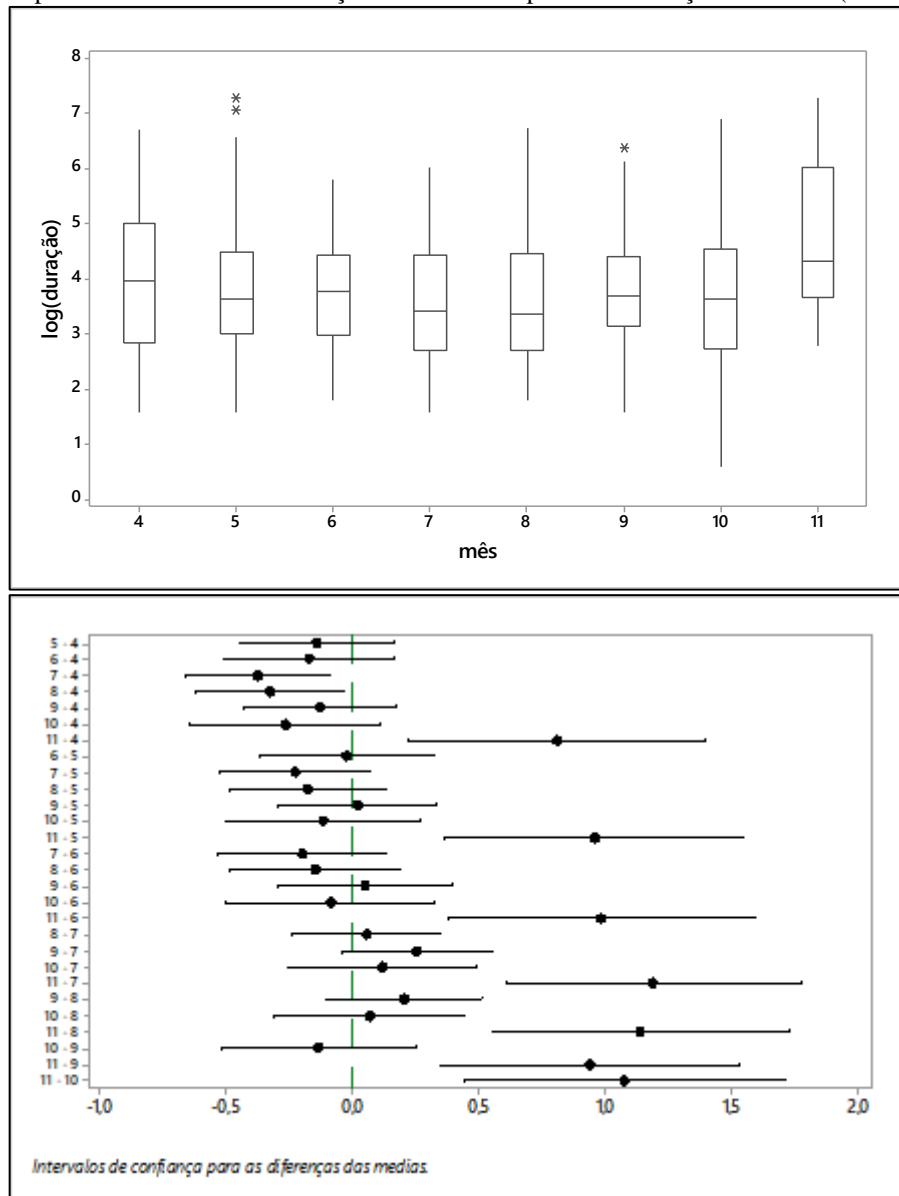
As medias dos tempos de reparo (uso de um modelo de ANOVA com os dados transformados) são estatisticamente diferentes entre os meses (valor-p = 0,003 < 0,05). Observa-se medias diferentes entre os pares de meses, MÊS 11 - MÊS 4, MÊS 11 - MÊS 5, MÊS 11 - MÊS 6, MÊS 11 - MÊS 7, MÊS 11 - MÊS 8, MÊS 11 - MÊS 9, MÊS 11 - MÊS 10, pois os intervalos de confiança 95% para as diferenças de medias não contém o valor zero (ver Figura 20).

Na Figura 20 também são dados os Box-plots para os dados de duração de reparos para os 8 meses.

Os EMV para as medias dos tempo de reparos μ_T para cada mês (4, 5, 6,...,10, 11), assumindo a distribuição log-normal (1) e considerando os dados na escala original são dados, respectivamente, por: 122,5260 (19,9595); 87,3849 (12,6470); 70,6985 (9,8606); 64,8706 (7,8265); 71,1885 (9,7577); 80,1714 (10,3952); 82,2416 (18,0095) e 324,3380 (159,8930).

Isso confirma que o mês 11 (novembro) tem maior tempo médio de reparos, um resultado similar ao obtido com os dados da Moenda A.

Figura 20 - Box-plots e intervalos de confiança 95% de Fisher para as diferenças de médias (meses).



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

(d) Grupo Denominação - D (Estratificação do grupo Causas)

Dos resultados da Tabela 13 (estatísticas descritivas), observa-se que o maior tempo médio de reparo para manutenção é dado para rampa de moagem com uma média de 259,7 minutos, seguido de ternos de moenda com uma média de 156,1 minutos. Considerando os

dados transformados ($\log(\text{duração})$), observa-se que as médias dos tempos de reparo (uso de um modelo de ANOVA) são estatisticamente diferentes ($\text{valor-p} < 0,05$).

Os EMV para as médias dos tempos de reparos μ_T , *Mean Time To Repair* (MTTR) para cada nível de grupo assumindo a distribuição log-normal (1) e considerando os dados na escala original são dadas na Tabela 14.

Tabela 13 - Estatísticas descritivas associadas aos níveis de grupo.

Variável	Denominação	N (Eventos)	Média (Min)	D.P. (Min)	Variância (Min) ²	Mediana (Min)
Duração (Min)	Acionamento da moenda	64	79,2	111,2	12365,9	36,6
	Alimentação do sistema d	71	34,51	55,88	3122,69	19,80
	Armazenagem de açúcar	4	155,0	206,0	42330,0	72,0
	Embebição	58	94,3	126,7	16057,6	48,3
	Esteira Intermediária	57	65,75	72,61	5271,83	46,20
	Excesso Capacidade de Mo	17	106,4	166,4	27697,9	25,2
	Fabricação de açúcar	41	107,8	124,4	15479,5	58,2
	Geração de energia	18	136,9	132,5	17556,1	89,4
	Geração de vapor	34	84,3	89,6	8025,8	45,0
	Movimentação de bagaço	64	81,4	102,4	10479,9	29,1
	Outros	3	30,8	34,1	1165,1	12,0
	Preparo de cana	79	90,5	141,0	19867,2	45,0
	Rampa de Moagem	29	259,7	261,6	68450,3	114,0
	Recepção de cana	43	95,7	280,6	78740,6	19,8
	Terno de moenda	45	156,1	318,6	101524,1	49,8
	Tratamento de caldo	81	76,4	106,2	11281,2	37,8
	Utilidades	5	26,9	33,9	1146,0	15,0

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Tabela 14 - EMV para as médias dos tempos de reparos μ_T associadas aos níveis de grupo

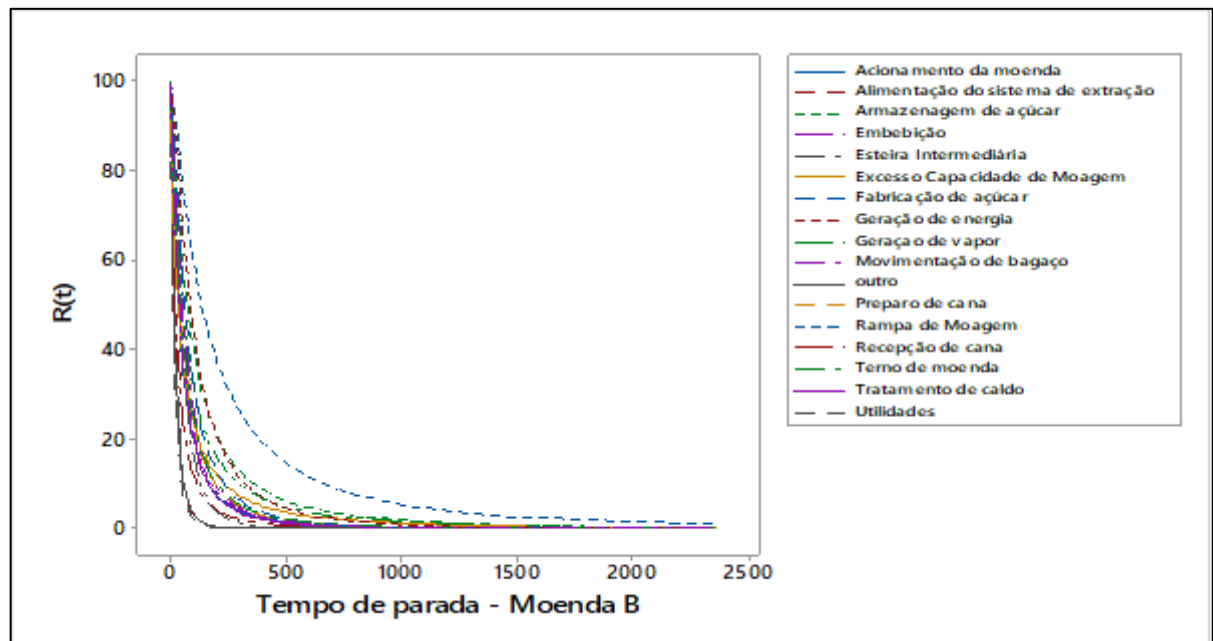
Variável	Denominação	N (Eventos)	μ_T (Min)	Erro-padrão (Min)
$\log(\text{duração})$	Acionamento da moenda	64	75,4509	14,0716
	Alimentação do sistema ext.	71	30,5930	3,3635
	Armazenagem de açúcar	4	161,131	129,918
	Embebição	58	90,6046	14,6191
	Esteira Intermediária	57	64,1906	8,3406
	Excesso Capacidade de Mo	17	104,956	52,5345
	Fabricação de açúcar	41	108,074	20,7952
	Geração de energia	18	149,310	43,4878

Geração de vapor	34	90,9054	23,1675
Movimentação de bagaço	64	80,4036	14,9935
Outros	3	29,9965	17,7817
Preparo de cana	79	87,2606	14,3382
Rampa de Moagem	29	292,383	86,8518
Recepção de cana	43	52,0491	12,3814
Terno de moenda	45	131,683	36,0101
Tratamento de caldo	81	74,9259	11,5608
Utilidades	5	24,9625	11,8666

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A Figura 21 mostra os gráficos das funções de confiabilidade $R(t)$.

Figura 21 - Probabilidades estimadas para $R(t) = P(T > t)$ com diferentes valores para t .



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o objetivo inicial desse estudo, a estratégia de manutenção em uma usina de açúcar e etanol localizada no estado de São Paulo, Brasil focado em duas moendas para o processamento de cana-de-açúcar em duas linhas de moagem foi analisado de forma detalhada a partir de uma análise estatística sob o enfoque de engenharia de confiabilidade e várias conclusões de grande interesse para a indústria do setor foram obtidos. A análise estatística dos dados operacionais da usina estudada aponta para três resultados relevantes.

O Primeiro resultado, referente ao código da falha, revelou que a disciplina de Mecânica emerge como a principal causa de reparos, destacando-se significativamente quando comparado a outras áreas operacionais, tanto na Moenda A quanto na Moenda B. Porém, quando estratificamos as causas, é notável que, o "Excesso de capacidade de moagem" contribui significativamente para as duas Moendas. Neste caso, as recomendações da literatura, conforme destacado por Plantullo (1994), a economia de tempo em operações diferentes da operação gargalo é ilusória e indicam a necessidade de ajustes no ritmo de alimentação de cana para garantir que a moagem esteja alinhada com a capacidade da máquina, evitando sobrecargas e interrupções não programadas. A otimização do processo de alimentação de cana é fundamental para reduzir a ocorrência desse problema específico. A estratégia da empresa foi melhorar a capacidade do processo de centrifugação de açúcar após avaliar que este era o gargalo.

Ainda sobre o primeiro resultado, é importante destacar que o MTBF aponta a causa EXTR (Extração e Moagem) como o principal ofensor para as duas moendas. Neste caso, apesar da causa não ser considerada como a principal nos modelos de confiabilidade para MTTR, observa-se que a Função Acumulada Média, aponta para um cenário preocupante pela frequência de ocorrências de falhas. Desta forma, quando se estratifica as causas, encontramos dois equipamentos com maior frequência de falhas no grupo "Denominação" que são: Acionamento de Moendas e Alimentação da extração. Sendo assim, a empresa objeto deste estudo, seguiu a estratégia mencionada por Fachini e Sellitto (2014), e adotou a Modernização (retrofitting) que consiste na reforma que inclui a atualização tecnológica do equipamento. Para o Acionamento da Moenda, foi adquirido um novo sistema hidráulico para a lubrificação das turbinas que acionam as moendas. E para o grupo "Alimentação da extração", as correntes das esteiras de cana, foram substituídas por correntes de material mais adequado para a aplicação. Os resultados serão observados na próxima entressafra com grande expectativa de melhora, uma vez que as soluções foram testadas previamente em outras unidades.

Outro fator impactante na avaliação dos dados, principalmente na Moenda B, que foi a “Rampa de moagem” quando olhamos para o modelo MTTR. Tomando-se como premissa, que para cada início de safra, os equipamentos iniciam como novos e que a “Rampa de moagem” é o apontamento para qualquer evento de reparo que ocorra nos 20 primeiros dias de moagem, pode-se concluir que, de acordo com Sellitto (2005), a estratégia mais adequada de manutenção para esta fase do ciclo de vida dos equipamentos é a manutenção corretiva. Nesse estágio, as falhas prematuras frequentemente surgem devido a problemas como má especificação, mau projeto, instalação inadequada ou baixa qualidade na fabricação de componentes de reposição. Portanto, uma abordagem corretiva não apenas aborda as falhas visíveis, mas também identifica e soluciona as deficiências subjacentes de origem.

O Segundo resultado, referente aos turnos, revelou que o turno C apresenta um tempo significativamente maior de reparos não programadas quando comparado aos turnos A e B, para ambas as moendas. Essa disparidade estatística suscita preocupações quanto à eficiência e produtividade da usina. Este fenômeno não é único e já foi documentado em outros estudos, como observado por Moreno, Fischer e Rotenberg (2003) um número crescente de pessoas depara-se com as dificuldades de trabalhar em horários não diurnos e/ou fins de semana, o que torna relevante a identificação das consequências do trabalho em turnos e das possibilidades de amenizar os problemas por ele causados em sua pesquisa sobre a gestão de turnos em ambientes industriais.

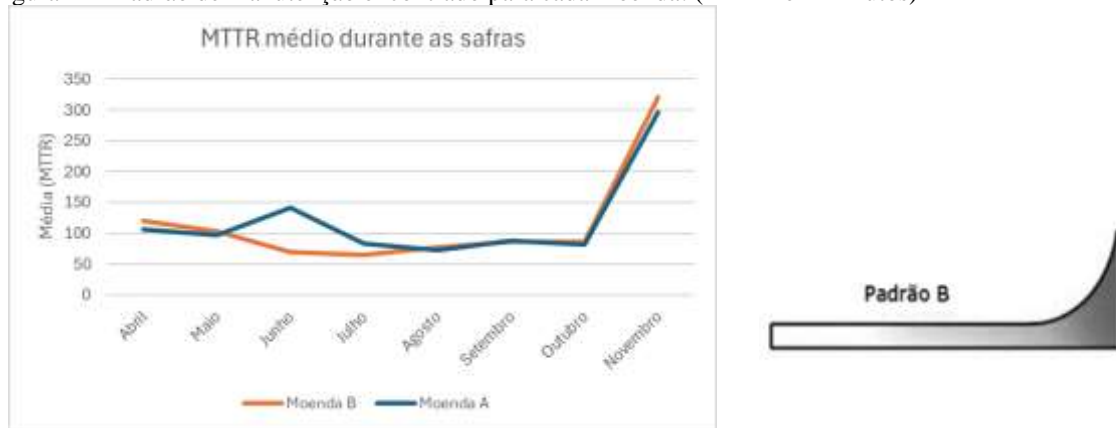
Nesse contexto, fica evidente a necessidade de ações corretivas para melhorar o desempenho do turno C que possui maiores médias de reparos e melhorar a eficiência dos demais turnos, uma vez que estatisticamente, existem diferenças nas médias. Uma abordagem eficaz para esse problema é a implementação de treinamentos dedicados em manutenção e operação (PINTO, 2009). Uma ferramenta sugerida para esse caso, introduzida por Wireman (1990) em um livro de sua autoria *O Total Productive Maintenance (TPM)*, traduzido no Brasil como “Manutenção Produtiva Total”, seria um programa onde todos desenvolvem atividades de melhoria contínua nos equipamentos e processos. A maximização da eficiência dos equipamentos e processos é obtida através de pequenos grupos de trabalho e implementação de atividades de manutenção autônoma”. Tu, Vonderembse e Ragu-Nathan (2001) considera a Manutenção Produtiva Total como um capacitador análogo à Manufatura Enxuta. Este capacitador evita que máquinas e processos não confiáveis levem a aumentos nos tempos de produção e consequentes atrasos nos prazos dos clientes. Dessa forma, investir em capacitação

técnica pode resultar em uma redução significativa nos reparos não programados e melhorias gerais na eficiência operacional.

O Terceiro resultado, referente aos meses, revelou uma disparidade significativa no tempo de reparos não programadas durante o mês de novembro, em comparação com os demais meses da safra. Esse achado indica os desgastes nos equipamentos ao longo da safra e requer estratégias diferentes nos meses anteriores para reduzir esse quadro.

Observando o gráfico apresentado na Figura 22, pode-se o padrão Tipo B, apresentado na revisão bibliográfica neste estudo que se resume ao Desgaste tradicional. Este padrão consiste em um baixo nível de falhas aleatórias durante a maior parte da vida útil do ativo, seguido por um aumento acentuado de falhas no final de sua vida útil.

Figura 22 - Padrão de manutenção encontrado para cada moenda. (MTTR em minutos)



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Essa tendência preocupante requer uma abordagem proativa para mitigar os reparos não programadas durante o mês de novembro. Nesse sentido, a indicação para realizar manutenções preventivas e preditivas mapeadas no decorrer da safra em todo o processo produtivo. Manutenção Preventiva é um método que visa minimizar as falhas em equipamentos por meio de intervenções planejadas em intervalos de tempo pré-definidos ou de acordo com critérios estabelecidos. De acordo com Figueiredo e Rodrigues (2017), essa abordagem reduz as chances de falha dos ativos. A manutenção preventiva envolve a realização periódica de inspeções e reparos para evitar o surgimento de avarias, conforme apontado por Goulart *et al.* (2016).

A Manutenção Preditiva é um enfoque que se baseia no estado atual do equipamento. Esse método envolve a coleta e análise de dados contínuos para supervisionar e monitorar o

desempenho do ativo, conforme mencionado por Goulart *et al.* (2016). A manutenção preditiva permite prever o momento ideal para a intervenção, garantindo que a manutenção seja realizada apenas quando necessário. O principal benefício dessa abordagem otimizada é que ela evita interrupções não planejadas, maximizando o tempo de operação eficiente do equipamento. Cerveira e Sellitto (2015) também ressaltam que a manutenção preditiva leva em consideração as condições reais do equipamento, evitando intervenções com base em suposições e permitindo que o ativo funcione por um período prolongado.

A estimativa de melhoria do indicador disponibilidade, é de 3 pontos percentuais para a próxima safra. Isto representa um ganho bastante atrativo pelo volume de cana processada da usina, objeto do estudo.

Para finalizar, é importante salientar que o uso de técnicas estatísticas apropriadas para a análise de dados de reparos de equipamentos (manutenção) como testes de hipóteses, intervalos de confiança, modelos de ANOVA, modelos de confiabilidade usados no presente estudo são extremamente importantes para detectar importantes fatores que impactam nos tempos de reparos para manutenção. Essas técnicas estatísticas, usadas no nosso estudo de caso podem ser usadas em muitas áreas de indústria e engenharia levando a menores custos e maior eficácia, resultados de grande interesse industrial.

REFERÊNCIAS

- ABED, K.; MUTLAG, S. Using AHP Methods in Maintenance to Improve Reliability and Equipment Performance. *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, p.012008, 2020.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas técnicas. **NBR-5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.
- AFEFY, I. H. Reliability-Centered Maintenance Methodology and Application: a case study. **Engineering**, v. 2, n. 11, p. 863-873, 2010
- ALSYOUF, I. Maintenance practices in Swedish industries: Survey results. **International Journal of Production Economics**, v.121, n.1, p.212-223, 2009.
- AZIZ, A *et al.* Operational risk assessment model for marine vessels. **Reliability Engineering & System Safety**, v.185, p.348-361, 2019.
- BARAN, L. R.to; FILHO Ramos, J.; PIECHNICKI, A. S.; IECHNICKI, F. Transferência de Tecnologia no processo de implantação do pilar de manutenção planejada. **Revista SODEBRAS**, v. 9, nº 102 – Junho de 2014.
- BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M.; GABBRIELLI, R. Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 16, n.4, p.313-324, 2000.
- BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. Revisitando a produção científica nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Production**, v.24, p.225-232, 2014.
- BRAND, G. G. **Método de apoio à formulação de estratégia de manutenção em ambiente industrial**: um estudo de caso. 2011, 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2011.
- BRANCO FILHO, G. **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna LTDA., 2008.
- BRAUER, D. C.; BRAUER, G. D. Reliability-centered maintenance. **IEEE Transactions on reliability**, v.36, n.1, p.17-24, 1987.
- BUCKERIDGE, M. S.; GRANDIS, A.; TAVARES, E. Q. P. Disassembling the glycomic code of sugarcane cell walls to improve second-generation bioethanol production. **Bioethanol production from food crops**, p 31-43, 2019.

CERVEIRA, D. S.; SELMITTO, M. A. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise quantitativa de um forno elétrico a indução. **Revista Produção Online**, v.15, n.2, p. 405-432, 2015.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia Científica**. São Paulo. Prentice hall, 5a edição, 2002.

CARRETERO, J. *et al.* Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks. **Reliability Engineering & System Safety**, v.82, n.3, p.257-273, 2003.

COLOSIMO, E. A.; GIOLO, S. R. **Análise de Sobrevivência Aplicada**. Blucher: São Paulo, 2006.

DIAS, A. **Confiabilidade na manutenção industrial**, 2010.

DHILLON, B. S. **Engineering maintenance: a modern approach**. 2ª. ed. Florida: CRC Press, 2002.

DHILLON, B. S. **Maintainability, maintenance and reliability for Engineers**. 1ª. ed. New York: CRC Press, 2006.

DIEDRICH, A.; SELMITTO, M. A. Manutenção centrada em confiabilidade - estudo de caso na indústria de bebidas, **Revista Eletrônica Produção em Foco**, v.4, n.1, 2014.

DOCKHORN, F. S. M.; BARBALHO, S. C. M. Smart maintenance: uma análise bibliométrica. **Anais... XXXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO** “Os desafios da engenharia de produção para uma gestão inovadora da Logística e Operações” Santos, São Paulo, Brasil, 15 a 18 de outubro de 2019.

DZULYADAIN, H.; BUDIASHI, E.; DWI ATMAJI, F. Proposed maintenance policy using reliability centered maintenance (RCM) method with FMECA analysis: A case study of automotive industry. *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2021, p. 012111.

ELSAYED, E. A. **Reliability engineering**. Massachusetts: Addison Wesley, 1996.

FACCHINI, Silmar José; SELMITTO, Miguel Afonso. **Análise estratégica da gestão da Manutenção industrial de uma empresa de metal mecânica**. Revista E-Tech: Tecnologias para competitividade Industrial ISSN-1983-1838, v. 7, n. 1, p. 49-66, 2014.

FARRERO, J. C.; TARRÉS, L. G.; LOSILLA, C. B. Optimization of replacement stocks using a maintenance programme derived from reliability studies of production systems. **Industrial Management & Data Systems**, v.102, n.4, p.188-196, 2002.

FIGUEIREDO, M. T.; RODRIGUES A. L. **Proposta de implantação da manutenção preventiva no setor de solda em uma empresa metalomecânica**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual de Maringá (UEM), Paraná, 2017.

FAGUNDES, A. M.; ROCHA, A. L.S. da; BARBOSA, S. R.; CARVALHO, A.L. Análise quantitativa de confiabilidade e disponibilidade de um torno cnc, baseado na metodologia RCM aplicado na área de manutenção industrial. **Anais... XXXI encontro nacional de engenharia da produção**. Belo Horizonte, 2011.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FRASER, K; HVOLBY, H.H; TSENG, T.L. Maintenance management models: a study of the published literature to identify empirical evidence. a greater practical focus is need. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.32, n.6, p 635-664. 2015.

GANDHARE, B. S.; AKARTE, M. M.; PATIL, P. P. Maintenance performance measurement: a case of the sugar industry, **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.24, n.1, p.79-100, 2018.

GAVIOLI, Giovana; SIQUEIRA, Maria Cristina Mendonça; SILVA, Paulo Henrique Ribeiro. **Aplicação do Programa 5S em um sistema de gestão de estoque de uma indústria de eletrodomésticos e seus impactos na nacionalização de recursos**. SIMPOI ANAI, 2009.

GOULART, N. H. B. *et al.* **Proposta de implantação de um sistema de manutenção preventiva em uma empresa de pequeno porte do ramo de fabricação de fraldas**. ENEGEP – ABEPRO. Maceió, 2016.

GONÇALVES, Edson. **Manutenção industrial: do estratégico ao operacional**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2015.

HAMEED, Z.; VATN, J.; HEGGSET, J. Challenges in the reliability and maintainability data collection for offshore wind turbines. **Renewable Energy**, v.36, n.8, p.2154-2165, 2011.

HORNER, R. M. W.; EL-HARAM, M. A.; MUNNS, A. K. Building maintenance strategy: a new management approach. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.3, n.4, p. 273-280, 1997.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção-função estratégica**. Rio de Janeiro, Qualitymark Editora Ltda, 2009.

KHAMIS, B.; HIREN, S. Use of reliability centered maintenance (RCM) analysis in petroleum development Oman (PDO) for maintenance rationalization. *In: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. SPE, 2000. p. SPE-87249-MS.

KOMNINAKIS, D. **Análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia**. 2017, 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade de Araraquara (UNIARA). Universidade de Araraquara, 2017.

KOMNINAKIS, D.; PIRATELLI, C. L.; ACHCAR, J. A. Análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia. **Revista Produção Online**, v.18, n.2, p.560-592, 2018.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro, Qualitmark Editora Ltda, 2001.

LAWLESS, J. F. **Statistical models and methods for lifetime data, Wiley series in probability and mathematical statistics**, John Wiley & Sons, 1982.

LEAL, O. P.; BAFFA, P.; GARCIA, H. L. Otimização da frequência na manutenção preventiva. **Anais... XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Fortaleza, 2006.

LEWIS, E. E. **Introduction to Reliability Engineering**. John Wiley & Sons, 1994.

LIMA, T. M. **Estudo energético do bagaço de diferentes variedades de cana-de-açúcar**. 2011, 73 f. Dissertação (mestrado em Química) do Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto-SP, 2011.

LIMA, J. R. T.; SANTOS, A. A. B.; SAMPAIO, R. R. Sistemas de gestão da manutenção. **Anais... XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, São Carlos – SP, 2010.

MACHADO, F.; ANDRADE, J. J. O. Emprego da confiabilidade para o estabelecimento de estratégias de manutenção na indústria metal-mecânica. **Anais... XXXIII Encontro Nacional De Engenharia de Produção**, ENEGEP, 2013.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados**. Atlas, 2003.

MENDES, A. A.; RIBEIRO, J. L. D. Estabelecimento de um plano de manutenção baseado em análises quantitativas no contexto da MCC em um cenário de produção JIT. **Production**, v. 24, n. 3, p. 675-686, 2014.

MENGUE, D. C.; SELLITTO, M. A. Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. **Revista Produção Online**, v.13, n. 2, p. 759-783, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v13i2.1341>. Acesso em: 10 de jan. 2024.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Revista Produção**, v.17, n.1, p.216-229, 2007.

MIGUEL, P. A. C. *et al.* **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro. Elsevier: ABREPO, 2a edição, 2012.

MIRSHAWKA, V.; OLMEDO, N. **Manutenção – Combate aos Custos da Não-Eficácia: A vez do Brasil**. São Paulo: Editora Makron Books do Brasil, 1993.

MOBLEY, R. K. **An Introduction to Predictive Maintenance**, Butterworth-Heinemann, Second Edition, 2002.

MOBLEY, K.; HIGGINS, L. R.; WIKOFF, D. **Maintenance Engineering Handbook**. 7ª. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

MOHAMMED, A.; GHAITHAN, A.; AL-SALEH, M.; AL-OFI, K. Reliability-Based Preventive Maintenance Strategy of Truck Unloading Systems. **Applied Sciences**, v.10, n.19, p. 6957, 2020.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**, 5nd Edition, John Wiley & Sons, 2010.

MOUBRAY, J. **Reliability-Centered Maintenance**. Industrial Press. New York, 1997.

MORENO, C. R. C.; FISCHER, F. M.; ROTENBERG, L. A Saúde do Trabalhador na Sociedade 24 Horas. **São Paulo em Perspectiva**, v.17, n.1, p.34 - 46, 2003

MUNOZCEVALLOS, J.; MACIAS, M. Mantenimiento centrado en la confiabilidad a equipos en industria de conservas de atún. **Científica**, v.25, p.1-12, 2022.

MURÇA, V. A. A. **Aplicação da Filosofia Lean na área da Manutenção**. Dissertação (Área Departamental de Engenharia Mecânica) do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012.

NAKAGAWA, T. **Maintenance theory of reliability**. 1ª. ed. Japan: Springer, 2005.

OLIVEIRA, J. C. S.; SILVA, A. P. Análise de Indicadores de qualidade e produtividade da manutenção nas indústrias brasileiras. **Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, GEPROS. Bauru, ano 8, n. 3, p.53-69, 2013.

PALMER, D. **Maintenance Planning and Scheduling Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2000.

PLANTULLO, V. L. Um Pouco Além do Just-in-Time: Uma Abordagem à Teoria das Restrições. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v.34, n.5, p.32-39, 1994.

PINTO, J. P. O. **Organização e gestão da manutenção**. Edições Cenertec, 2003.

RAMOS, F. V.; VIEIRA, I. A.; SILVA, N. F.; PEREIRA, A. R. Estratégia de manutenção por meio de análises confiabilidade em uma rede de energia elétrica. **Anais... XXXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, ENEGEP, 2014.

RAMOS FILHO, J. A. R.; ATAMANCZUK, M. J.; MARÇAL, R. F. M. Seleção de técnicas de manutenção para o processo de armazenagem pelo método de análise hierárquica. **Produção Online**, v.10, n.1, p.142-166. 2010.

RAPOSO, C. F. C. Overall Equipment Effectiveness: aplicação em uma empresa do setor de bebidas do polo industrial de Manaus. **Revista Produção Online**, v.11, n.3, p.648-667, 2011.

RAUSAND, M. Reliability centered maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, v.60, n.2, p.121-132, 1998.

RUSCHEL, E.; SANTOS, E. A. P.; LOURES, E. F. R. Industrial maintenance decision-making: a systematic literature review. **Journal of Manufacturing Systems**, v.45, p.180-194, 2017.

SABOUHI, H. *et al.* Reliability modeling and availability analysis of combined cycle power plants. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v.79, p.108-119, 2016.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do Potencial de Geração de Energia Elétrica para Diferentes Fontes de Biogás no Brasil. **Renabi, Biomassa & Energia**, v.2, n.1, p.57-67, 2005.

SANTOS, W. B.; COLOSIMO, E. A.; MOTTA, S. B. Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório. **Gestão & Produção**, v.14, n.1, p.193-202, 2007.

SELLITTO, M. A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Production**, v.15, n.1, p.44-59, 2005.

SELLITTO, M. A.; BORCHARDT, M.; ARAUJO, D. R. C. Manutenção centrada em confiabilidade: aplicando uma abordagem quantitativa. **Anais... XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, ENEGEP, 2002.

SELVIK, J. T.; AVEN, T. A framework for reliability and risk centered maintenance. **Reliability Engineering & System Safety**, v.96, n.2, p.324-331, 2011.

SIQUEIRA, I. P. **Manutenção Centrada na Confiabilidade**: manual de implementação. Qualitymark Editora Ltda, 2005.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. Atlas, 2002.

SHARMA, R.; BHATTRAJ, N. Reliability Based Maintenance in Hydropower: A Case Study of Bijaypur-I Small Hydropower Plant. **Journal of Innovations in Engineering Education**, v.3, p.123-130, 2020.

SMITH, A. **Reliability-Centered Maintenance**. McGraw-Hill New York, 1993.

STEFANINI, P. **Metodi di Ricerca e Prevenzione dei Guasti**. Milano: Tecniche Nuove II Edizione, 2011.

TATSCH, D. M. **Metodologia da manutenção centrada na confiabilidade aplicada em uma máquina de montar pneus**. 2010. 31 f. Monografia (Graduação de Engenharia Mecânica) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRG). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

TAVARES, L. **Excelência na Manutenção – Estratégias, otimização e Gerenciamento**. Salvador: Casa da Qualidade Editora Ltda, 1999.

TONON FILHO, R. J. **Modelagem e simulação em plantas de etanol: uma abordagem técnico-econômica**. 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2013.

TSAROUHAS, P.H; VARZAKAS, T.H; ARVANITOYANNIS, I.S. Reliability and maintainability analysis of strudel production line with experimental data – a case. **Journal of Food Engineering**, v.91, n.2, p.250-259, 2009.

TU, Q.; VONDEREMBSE, M. A.; RAGU-NATHAN, T. S. The impact of time-based manufacturing practices on mass customization and value to customer. **Journal of Operations Management**, v.19, p.201-217, 2001.:

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Safra 2021/2022 processa 523 milhões de toneladas de cana**. UNICA. Brasília, 22 abr. 2022.

VACCARO, G. L. R. **Modelagem e análise da confiabilidade de sistemas**. 1997, 222 f. Dissertação (Mestrado Em Engenharia De Produção) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul (UFRGS). Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Rio Grande Do Sul, 1997.

VAZ, J. C. **Manutenção de sistemas produtivos: um estudo sobre a gestão da disponibilidade de equipamentos**, 2003, 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

VIANA, H. **PCM: Planejamento e Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro. Qualitymark Editora Ltda, 2002.

VISHNU, C. R.; REGIKUMAR, V. Reliability based maintenance strategy selection in process plants: a case study. **Procedia Technology**, v.25, p.1080-1087, 2016.

WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L. CIBOCOF: a framework for industrial maintenance concept development. **International Journal of Production Economics**, v.121, n.2, p.633-640, 2009.

WIREMAN, T. **World class maintenance management**. New York: Industrial Press Inc., 171 p., 1990.

YSSAAD, B.; KHIAT, M.; CHACKER, A. Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems. **Electrical Power and Energy Systems**, v.55, p.108–115, 2014.

ZAIOS, D. R. **Consolidação da Metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade em uma Planta de Celulose e Papel**. 2003, 219 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ZENG, S. Discussion on maintenance strategy, policy and corresponding maintenance systems in manufacturing. **Reliability Engineering & System Safety**, v.55, p.151-162, 1997.