

**LUIS FELIPE ARANTES PEIXOTO LUNARTI**

**ESTUDO DE CASO DO PROCESSO DE  
MANUTENÇÃO EM COLHEDORAS DE CANA-DE-  
AÇÚCAR DE UMA USINA DE BIOENERGIA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2023**

**LUIS FELIPE ARANTES PEIXOTO LUNARTI**

**ESTUDO DE CASO DO PROCESSO DE MANUTENÇÃO EM  
COLHEDORAS DE CANA-DE-AÇÚCAR DE UMA USINA DE  
BIOENERGIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
à Universidade Federal de Uberlândia  
(UFU), como requisito para a obtenção do  
diploma de **Graduação em Engenharia  
Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano José Arantes

**UBERLÂNDIA - MG**

**2023**

# **LUIS FELIPE ARANTES PEIXOTO LUNARTI**

## **ESTUDO DE CASO DO PROCESSO DE MANUTENÇÃO EM COLHEDORAS DE CANA-DE-AÇÚCAR DE UMA USINA DE BIOENERGIA**

Projeto de Conclusão de Curso avaliado pela banca examinadora do curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Luciano José Arantes – UFU - Orientador

---

Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva - UFU

---

Profa. Dra. Rosenda Valdes Arencibia – UFU

**Uberlândia, 29 de novembro de 2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio ao longo de toda minha trajetória, em especial aos meus pais, meu irmão e minha namorada, que sempre estiveram comigo e se fizeram presentes em todos os momentos.

Aos meus amigos de Itumbiara e todos que ao longo da graduação encontrei em Uberlândia, por toda força e apoio, parceria e companheirismo nos momentos que passamos juntos.

E aos meus professores da graduação, em especial ao meu professor orientador, Prof. Dr. Luciano José Arantes, por todo conhecimento que me foi transmitido.

## RESUMO

Devido ao processo de mecanização agrícola do setor de bioenergia observou-se o aumento da produtividade e da competitividade entre as empresas. A utilização de maquinários complexos trouxe a necessidade de desenvolver o setor de manutenção automotiva com novas estratégias e ferramentas, como a manutenção centrada na confiabilidade, otimizando as atividades do setor. As aplicações de novas metodologias, no entanto, devem ser estudadas previamente a fim de garantir que os objetivos almejados pela equipe de manutenção sejam alcançados. Desta forma, este trabalho apresenta um estudo de caso, explanando conceitos e aplicando a análise dos índices de manutenção obtidos, a partir da coleta dos dados de cinco colhedoras de cana-de-açúcar, de uma empresa de bioenergia. Adicionalmente, modelos de distribuição de probabilidade de falhas e estudo de confiabilidade são apresentados, identificando componentes críticos dos equipamentos e demonstrando estratégias para a prevenção de quebras não programadas destes componentes, permitindo a melhor performance dos equipamentos.

Palavras-chave: Manutenção, Falhas, Confiabilidade, Probabilidade.

## **ABSTRACT**

Due to the agricultural mechanization process in the bioenergy sector, it is seen the increase of the productivity and competitiveness between the companies. The use of complex machinery brought the need to develop the automotive maintenance sector with new strategies and tools, as the reliability centered maintenance, optimizing the sector activities. The use of new strategies should be studied, in order to obtain the maintenance team objectives. In this way, this work presents a case study, explaining the concepts and applying the analysis of maintenance indexes obtained from data of five sugarcane harvesters, from a bioenergy company. Failure distribution models and reliability studies are presented, identifying critical components of the equipment's and showing strategies to prevent not programmed failures of these components, allowing a better performance of the equipment.

Keywords: Maintenance, Failures, Reliability, Probability.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade

MTBF – *Mean Time Between Failure*

TMEF – Tempo Médio Entre Falhas

MTTR – *Mean Time To Repair*

TMR – Tempo Médio para Reparo

FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis*

HD – Horas Disponíveis

NC – Número de Ocorrências

HT – Horas Trabalhadas

HG – Horas Totais do Período

HO – Horas de Operação

HM – Horas de Manutenção Totais

IC – Índice de Corretiva

IP – Índice de Preventiva

HMC – Horas de Manutenção Corretiva

HMP – Horas de Manutenção Preventiva

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução temporal de gerações de manutenção. ....	14
Figura 2. Gráfico investimentos versus nível de manutenção. ....	17
Figura 3. Tipos de manutenção e características. ....	18
Figura 4. Diagrama de Pareto. ....	20
Figura 5. Questões aplicáveis ao sistema objeto da manutenção. ....	23
Figura 6. Diversas visões de uma Falha. ....	25
Figura 7. Curva da Banheira. ....	28
Figura 8 - Influência parâmetro de escala. ....	30
Figura 9 - Influência parâmetro de forma. ....	31
Figura 10 - Influência do parâmetro de forma na função de risco - Distribuição Weibull .....	32
Figura 11. Sistemas Colhedora de Cana-de-Açúcar. ....	34
Figura 12. Corte de Pontas. ....	35
Figura 13. Divisores de Linha. ....	36
Figura 14. Corte de Base. ....	36
Figura 15. Rolos alimentadores. ....	37
Figura 16. Sistema Picador. ....	37
Figura 17. Extrator Primário. ....	38
Figura 18. Sistema Elevador. ....	38
Figura 19. Extrator Secundário. ....	39
Figura 20. Sistema Rodante. ....	39
Figura 21. Sistema de Geração de Potência. ....	40
Figura 22. Sistema Hidráulico. ....	40
Figura 23. Estação de Operação. ....	41
Figura 24. Pareto de falhas - Frota 10007. ....	43
Figura 25. Pareto de falhas - Frota 10010. ....	44
Figura 26. Pareto de falhas - Frota 10011. ....	44
Figura 27. Pareto de falhas - Frota 10014. ....	45
Figura 28. Pareto de falhas - Frota 10015. ....	46
Figura 29 - Confiabilidade Facões. ....	51
Figura 30 - Taxa de Falhas Facões. ....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equipamentos de Estudo .....	34
Tabela 2 - MTBF e MTTR .....	46
Tabela 3 - Disponibilidade Física de Máquinas .....	47
Tabela 4 - Índices de Corretiva .....	48
Tabela 5 - Intervenções Sistema Picador .....	49
Tabela 6 - Intervenções nos Facões .....	50
Tabela 7 - Parâmetros Distribuição Weibull.....	50

# SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1.	Motivação .....	12
1.2.	Objetivo .....	13
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
2.1.	Definição de Manutenção .....	13
2.2.	Termos da Manutenção .....	15
2.3.	Tipos de Manutenção .....	15
2.3.1.	Manutenção Corretiva .....	15
2.3.2.	Manutenção Preventiva .....	16
2.3.3.	Manutenção Preditiva .....	17
2.4.	Métricas de Manutenção.....	18
2.5.	Confiabilidade.....	21
2.6.	Sistemas reparáveis e não reparáveis .....	21
2.6.1.	Sistemas Não Reparáveis .....	22
2.6.2.	Sistemas Reparáveis.....	22
2.7.	Manutenção Centrada na Confiabilidade .....	22
2.7.1.	Identificação das Falhas .....	25
2.8.	Parâmetros da Confiabilidade.....	26
2.8.1.	Função de Probabilidade Acumulada.....	26
2.8.2.	Função Densidade de Probabilidade .....	26
2.8.3.	Função de Confiabilidade .....	27
2.8.4.	Função de Risco.....	27
2.9.	Distribuições de Probabilidade – Sistemas não reparáveis.....	28
2.9.1.	Distribuição Exponencial.....	29
2.9.2.	Distribuição Weibull .....	29
2.9.3.	Distribuição Lognormal .....	32
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>

3.1.	Descrição da Empresa Analisada .....	33
3.2.	Descrição dos Equipamentos Objetos do Estudo .....	33
3.3.	Divisão das Colhedoras em Sistemas Principais .....	34
3.4.	Fluxo de Manutenção .....	41
3.4.1.	Notas de Serviço .....	41
3.4.2.	Ordens de Serviço .....	42
3.4.3.	Desenvolvimento do Trabalho .....	42
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
4.1.	Paretos de Falhas.....	43
4.2.	MTBF/MTTR.....	46
4.3.	Disponibilidade Física de Máquinas.....	47
4.4.	Índice de Corretiva/Preventiva .....	48
4.5.	Confiabilidade Sistemas – Componentes .....	48
4.5.1.	Distribuição de Probabilidade .....	50
4.5.2.	Confiabilidade Facões do Sistema Picador.....	51
4.5.3.	Taxa de Falhas Facões do Sistema Picador .....	52
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>54</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

A cana-de-açúcar é um dos pilares do desenvolvimento econômico brasileiro, desde o século XVI no Brasil Colônia, com seu cultivo iniciando nas chamadas capitâneas hereditárias e até hoje, sendo uma das alternativas aos combustíveis fósseis para produção de energia. Desde o início de seu cultivo, os processos de plantio e colheita evoluíram, passando de atividades manuais para a mecanização quase que completa dos processos. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), o Brasil atingiu na safra 2022/23, 90,8% de mecanização na colheita de cana, um aumento de aproximadamente 1,4% em relação à safra passada.

Desta forma, observa-se a importância que os equipamentos envolvidos nos processos de colheita possuem. Por um lado, a colheita mecanizada contribuiu para minimizar danos ambientais, evitando a queima da cana na colheita manual e proporciona melhores condições de trabalho para os trabalhadores envolvidos. Entretanto, nota-se a necessidade de manter os equipamentos operacionais e em bom estado de funcionamento, para que imprevistos não ocorram durante o processo de colheita, podendo diminuir a produtividade das empresas e aumentar os custos com a manutenção destes equipamentos.

Hoje, as colhedoras de cana-de-açúcar representam uma alta parcela do custo de manutenção do ramo sucroenergético e segundo Mirshawka e Olmedo (1993), o custo de manutenção é um dos responsáveis pelo sucesso de uma empresa. Desta forma, são aplicadas estratégias para a gestão destes ativos, como por exemplo a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) e Manutenção Produtiva Total.

Para Moubrey (1997), estratégias como a MCC, se aplicadas corretamente, transformam as relações entre os empreendimentos que as utilizam, seus ativos e as pessoas que os operam, mantendo os ativos operacionais. Permite também que estes equipamentos sejam postos em serviço com maior rapidez, precisão e confiança.

### **1.1. Motivação**

A proposta do presente trabalho se dá pela necessidade de se avaliar e acompanhar o processo de manutenção em frotas de equipamentos agrícolas. A competitividade do mercado exige que as empresas do ramo de bioenergia produzam mais, com menores custos, desta forma exigindo dos equipamentos a melhor performance de operação.

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) – 2023, a safra 2022/23 de cana-de-açúcar do país encerrou-se com uma produção estimada em 610,1 milhões de toneladas, com um crescimento de aproximadamente 5,4% em relação à safra passada. Desta forma, com crescente produção e crescente mecanização dos processos de colheita, o setor de manutenção das empresas é a cada ano posto em prova para se manter o desempenho da produção.

## **1.2. Objetivo**

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo o estudo e avaliação do processo de manutenção de colhedoras de cana-de-açúcar, em uma empresa localizada no sul do estado de Goiás, resultando na obtenção e análise dos indicadores de manutenção destes equipamentos, geridos em planos de manutenção centrados na confiabilidade. Dentro do estudo, são apresentados os objetivos específicos como:

- Levantamento dos métodos de manutenção de colhedoras de cana-de-açúcar;
- Realizar a coleta e análise dos dados de falhas e atividades de manutenção;
- Apresentar os indicadores de manutenção e justificar resultados;
- Quantificar a confiabilidade de componentes do equipamento para entendimento da performance dos itens;

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Definição de Manutenção**

Conforme a norma da ABNT (NBR 5462, 1994), manutenção é definida como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. Modificações desse item também podem ser consideradas atividades de manutenção. Segundo Xenos (1998), as atividades de manutenção servem para basicamente evitar a degradação dos equipamentos e instalações, causadas pelo desgaste natural e uso.

Pode-se estudar a evolução da manutenção, descrevendo-a em três gerações, como exemplificado por Moubray (1997). Segundo o autor, a primeira geração compreende-se até

a Segunda Guerra Mundial, onde nesta época as indústrias existentes não eram altamente mecanizadas e por isso, paralisações devido a quebras de equipamentos não eram muito importantes. Neste caso, a manutenção era aplicada após a ocorrência das falhas.

A segunda geração inicia-se a partir da Segunda Guerra Mundial, e com o aumento da mecanização das indústrias, as máquinas eram mais numerosas e mais complexas, onde neste caso, as plantas industriais tinham maior dependência dos equipamentos. Por isso, buscava-se a maior disponibilidade e vida útil dos componentes, aliados a um menor custo de manutenção.

A terceira geração, referindo-se à atualidade, é caracterizada pela maior disponibilidade, confiabilidade, segurança, vida útil e a ausência de riscos e danos às pessoas e ao meio ambiente. São utilizadas ferramentas para a tomada de decisões, como o estudo de modos de falhas e efeitos. E é neste contexto que se inicia o desenvolvimento de um processo de tomada de decisão compreensivo, como descrito por Moubray (1997), conhecido como Manutenção Centrada em Confiabilidade ou RCM, do inglês *Reliability Centered Maintenance*.

A Figura 1 ilustra a evolução temporal destas gerações, após a Segunda Guerra Mundial.

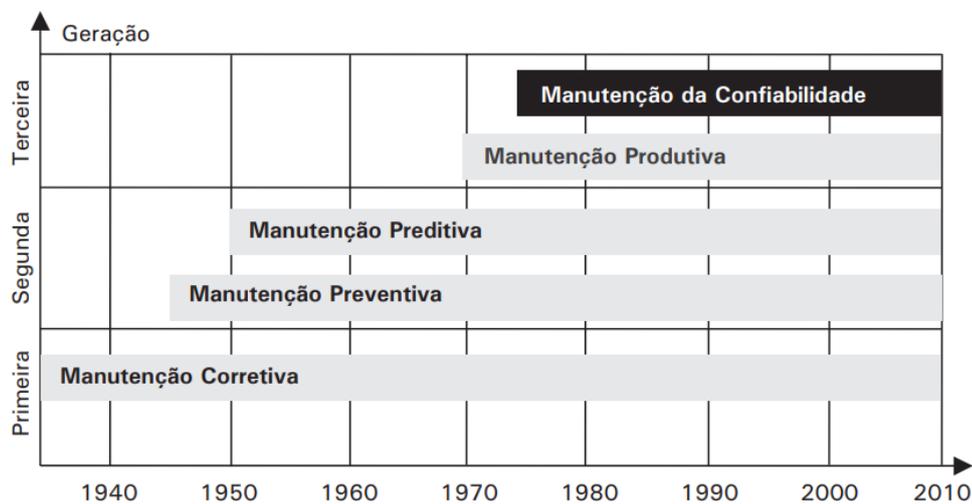


Figura 1. Evolução temporal de gerações de manutenção.

Fonte: Siqueira (2014).

Nesta terceira geração da manutenção, é necessária a avaliação sistemática das falhas, decidindo os métodos mais adequados para a gestão da manutenção das empresas.

## 2.2. Termos da Manutenção

Para o entendimento dos métodos de manutenção, deve-se primeiramente ocorrer a discussão de alguns termos específicos, relevantes ao assunto. Segundo a norma da ABNT NBR 5462 (1994) são descritos os termos relevantes à manutenção, como:

- Falha: É a incapacidade de um componente ou sistema desempenhar a função desejada.
- Pane: É o estado em que se encontra um componente ou sistema incapaz de desempenhar uma função requerida, exceto a incapacidade durante atividades planejadas como manutenções preventivas. A pane normalmente é devido a ocorrência de uma falha, porém pode existir sem que haja uma falha antecedendo.
- Defeito: É considerado qualquer desvio das características do componente quando comparado aos seus requisitos. Um componente ou sistema pode ou não ser afetado por um defeito.
- Disponibilidade: É a capacidade de um sistema ou componente realizar uma função desejada durante um intervalo de tempo determinado.

## 2.3. Tipos de Manutenção

Segundo Lafaia (2001), os métodos de manutenção podem ser classificados como: Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva e Manutenção Preventiva-Preditiva ou simplesmente Manutenção Preditiva. Adicionalmente, a manutenção corretiva ainda pode ser classificada como manutenção corretiva não planejada e manutenção corretiva planejada (Kardec e Nascif, 2013).

### 2.3.1. Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva reúne as ações tomadas para retornar um sistema do estado de falha para o estado operacional. Neste método, a manutenção ocorre de forma não planejada, após a ocorrência da falha.

Desta forma é necessário avaliar a opção por esta estratégia pois, segundo Xenos (1998), a manutenção corretiva implica na parada do equipamento não programada, gerando impactos na produção e qualidade do produto final, e a necessidade de recursos disponíveis, como peças de reposição, ferramentas e mão de obra, para que a correção da falha e parada do equipamento seja rápida. Por isso, devem ser analisadas se existem ações que possam ser tomadas a fim de evitar a ocorrência da falha no equipamento. Não existindo estas ações, viáveis e econômicas, a manutenção corretiva pode ser aplicada.

Segundo Kardec e Nascif (2013) a manutenção corretiva pode ser dividida em duas atividades: Manutenção Corretiva Não Planejada e a Manutenção Corretiva Planejada. A manutenção corretiva não planejada é a correção de uma falha aleatória, após o acontecimento da falha e sem tempo prévio para a preparação do serviço. Esta implica altos custos devido à parada de produção, perda de qualidade do produto e custos indiretos de manutenção.

A manutenção corretiva planejada ocorre quando há a decisão de se manter o equipamento em operação até sua quebra, com tempo suficiente para preparação do serviço de correção e melhor planejamento das atividades de reparo. Outros pontos são a segurança, rapidez e menor custo que as atividades planejadas têm em relação às atividades não planejadas.

### 2.3.2. Manutenção Preventiva

Segundo a NBR 5462 (1998), a manutenção preventiva é realizada em intervalos predeterminados ou com critérios definidos, a fim de minimizar a probabilidade de falhas e interrupções do funcionamento de um item.

Para Xenos (1998), a manutenção preventiva deve ser a atividade principal de manutenção em qualquer empresa pois, a aplicação desta estratégia pode diminuir a frequência de falhas, aumentar a disponibilidade de equipamentos e conseqüentemente a diminuição das paradas de produção. Esta atividade envolve tarefas sistemáticas como inspeções, reformas e troca de peças, podendo elevar o custo de manutenção.

Desta forma, é preciso a avaliação correta da aplicação das atividades preventivas pois, segundo Mirshawka e Olmedo (1993), investimentos crescentes em manutenções preventivas possuem efeitos positivos sobre o custo total de manutenção de um equipamento, até um ponto ótimo. Assim, as manutenções preventivas reduzem os custos de falhas, reduzindo o custo total de manutenção. A partir deste ponto ótimo, o custo da

manutenção preventiva traz poucos benefícios para a redução de custos de falhas, elevando o custo total, conforme é mostrado na Fig. 2.

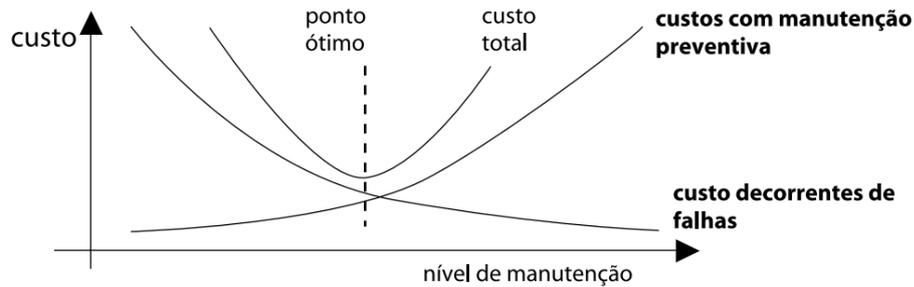


Figura 2. Gráfico investimentos versus nível de manutenção.

Mirshawka e Olmedo (1993).

### 2.3.3. Manutenção Preditiva

Esta é a manutenção que, com base na aplicação de técnicas de análise, são avaliados parâmetros do equipamento e com base nos resultados encontrados pode indicar ações para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva. (NBR 5462, 1998).

Para Xenos (1998), o acompanhamento técnico dos componentes da manutenção preditiva permite otimizar a substituição ou reforma de peças, estendendo os intervalos de manutenção. Variáveis como perfis de vibração, amostragem e análise de lubrificantes e medições de desgaste dos componentes são algumas das técnicas utilizadas para a avaliação do estado dos componentes.

A manutenção preditiva é a primeira grande mudança de paradigma na manutenção, pois com o desenvolvimento de técnicas de medições, é possível a avaliação e verificação de componentes sem que haja a parada dos equipamentos, ou seja, os ativos continuam produzindo, contribuindo para o aumento da disponibilidade dos ativos (KARDEC; NASCIF, 2013).

A partir da bibliografia citada é possível apresentar os tipos de manutenção através da Fig. 3 a seguir:



Figura 3. Tipos de manutenção e características.

## 2.4. Métricas de Manutenção

Devido a necessidade de alto desempenho dos setores de manutenção das empresas, são utilizados índices para a avaliação da real situação do processo de manutenção, onde é acompanhada a evolução das ações tomadas e onde podem ser propostos trabalhos de melhorias, visando obter as metas almejadas. Estes índices devem ser utilizados de acordo com as reais necessidades do setor, onde para uma determinada empresa, um indicador pode ser útil e para outra não.

- MTBF

O chamado *Mean time between failures*, também conhecido pelo termo em português, tempo médio entre falhas (TMEF), é um indicador definido como a divisão das horas disponíveis para operação do equipamento (HD), pelo número de intervenções corretivas no equipamento durante este período (NC), conforme a Eq. (1).

$$MTBF = \frac{HD}{NC} \quad (1)$$

Este índice é utilizado para analisar o comportamento dos equipamentos, face às atividades de manutenção. Caso o valor aumente ao passar do tempo, significa que o

número de intervenções corretivas está diminuindo, e assim o tempo total disponível para operação está aumentando.

- MTTR – *Mean time to repair*, ou TMR – Tempo médio de reparo;

O tempo médio de reparo apresentado na Eq. (2), é calculado pela divisão entre a soma total de horas de indisponibilidade do equipamento para operação (HIM) e a quantidade de intervenções corretivas neste período (NC).

$$MTTR = \frac{HIM}{NC} \quad (2)$$

Observa-se que quanto menor o MTTR melhor, pois significa que as ações corretivas possuem menor impacto na produção.

- TMPF – Tempo médio para falha;

Para componentes não reparáveis, ou seja, peças que se falharem são substituídos por novos, o MTTR é igual a zero. Logo, o tempo médio para falha (TMPF) consiste na relação entre o total de horas disponíveis (HD) dividido pelo número de falhas encontradas em componentes que não sofrem reparos, apresentado na Eq. (3).

$$TMPF = \frac{HD}{N^{\circ} \text{ de Falhas}} \quad (3)$$

- Disponibilidade física;

A disponibilidade física é um índice fundamental, pois o objetivo geral da manutenção é disponibilizar o maior número de horas possível do equipamento para operação.

Desta forma é a relação entre as horas trabalhadas (HT) e as horas totais do período (HG) conforme a Eq. (4).

$$Disp. Física = \frac{HT}{HG} \times 100\% \quad (4)$$

- Diagrama de Pareto;

Este diagrama, ou Gráfico de Pareto é bastante utilizado para melhorar a visão dos problemas de um processo. Com ele, pode-se focar nas causas mais significativas de um problema. Esta ferramenta também pode ser conhecida como 80/20, onde 80% das consequências são decorridas de 20% das causas, evidenciando que a maior parcela das causas geram a menor parcela de consequências, ou seja, são triviais.

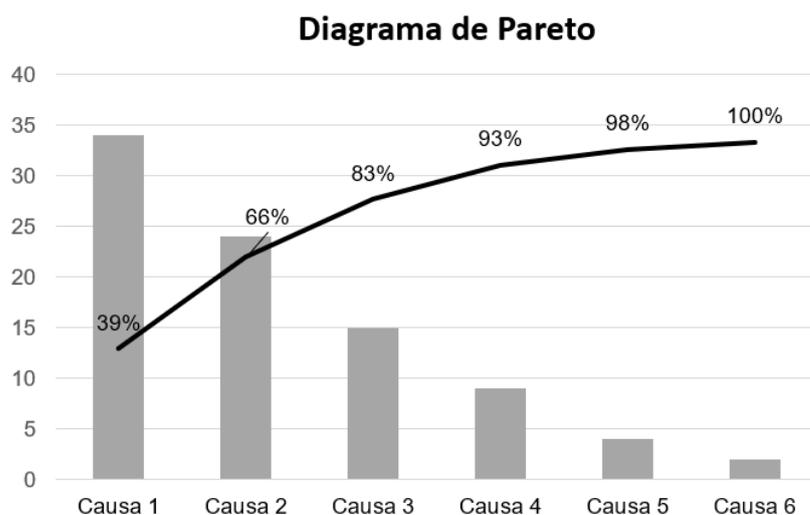


Figura 4. Diagrama de Pareto.

- Índice de Corretiva

Este índice objetiva fornecer a real situação, da ação, planejamento e programação, indicando o percentual das horas de manutenção que foram dedicadas em corretiva. A Eq. (5) demonstra o cálculo do índice.

$$IC = \frac{HMC}{\sum HMC + \sum HMP} \times 100\% \quad (5)$$

Onde HMC são as horas de manutenção em corretiva e HMP e as horas de manutenção em preventiva.

Um patamar aceitável para este indicador deve, segundo Viana (2002), estar abaixo de 25% do total de horas da planta. Normalmente um índice acima de 50% indica um caos na

manutenção, pois o PCM e as áreas executantes só gerenciam reclamações, possuindo um comportamento majoritariamente reativo, após o acontecimento das falhas.

- Índice de Preventiva

Representado pela Eq. (6), este se dá o oposto de IC, logicamente se tem-se um IC=30%, o IP será de 70%. Quanto maior o valor deste índice melhor para a manutenção. Caso atingir 75% de IC, significa que a manutenção possui rotinas e tarefas bem definidas e com recursos liberados para a busca da melhoria contínua dos processos do setor.

$$IP = \frac{HMP}{\sum HMC + \sum HMP} \times 100\% \quad (6)$$

## 2.5. Confiabilidade

Segundo a NBR 5462 (1994), a confiabilidade se dá na capacidade de um equipamento ou componente desempenhar sua função corretamente em condições específicas, dado um intervalo de tempo, podendo ser usada como uma medida de desempenho dos equipamentos ou sistemas. Situações em que um componente não desempenha suas funções como o esperado são indesejáveis, podendo ocasionar prejuízos financeiros como a queda de produção de empresas e também causar impactos ambientais e aos colaboradores em casos de acidentes.

Desta forma, segundo Lafraia (2002) as precauções contra estas situações não desejáveis somente são possíveis de serem implementadas quando é feita a avaliação quantitativa e qualitativa do nível de risco envolvido, para que os pontos falhos dos produtos e sistemas sejam identificados e ações preventivas ou corretivas eficientes sejam criadas. Assim a chamada análise de confiabilidade é a avaliação de probabilidade do risco ou falha de um sistema ou produto. O estudo de confiabilidade pode ser ainda dividido para sistemas considerados reparáveis ou não reparáveis.

## 2.6. Sistemas reparáveis e não reparáveis

### 2.6.1. Sistemas Não Reparáveis

Os sistemas considerados não reparáveis são aqueles que podem ser considerados descartados após a ocorrência de uma falha, ou seja, quando não desempenham sua função como o esperado. Componentes e peças são consideradas sistemas não reparáveis.

### 2.6.2. Sistemas Reparáveis

Já os sistemas considerados reparáveis são os que podem ser restaurados à sua função caso há a ocorrência de uma falha. Grande parte dos sistemas mecanizados, como colhedoras de cana de açúcar, podem ser considerados sistemas reparáveis. Na restauração do equipamento, podem ser classificados três tipos de reparos:

- **Reparo mínimo:** O reparo executado faz com que o sistema volte à condição que estava imediatamente antes da falha, usualmente chamado de “tão ruim quanto velho”.
- **Reparo perfeito:** O reparo faz com que o sistema volte a ter uma condição de novo, ou “tão bom quanto novo”.
- **Reparo imperfeito:** É um nível intermediário entre o reparo mínimo e o reparo perfeito, onde o reparo imperfeito retorna ao sistema uma condição entre o estado de novo e o estado imediatamente antes da falha.

## 2.7. Manutenção Centrada na Confiabilidade

Então, a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) é o processo utilizado para determinar quais ações devem ser tomadas para assegurar que qualquer ativo físico continue desempenhando da forma que seus usuários esperam no seu contexto operacional, descreve Moubrey (1997).

A MCC oferece uma estrutura para avaliação das funções e falhas potenciais dos ativos, com ênfase na preservação das funções dos sistemas dos equipamentos, não propriamente na preservação dos equipamentos. Esta estratégia permite a programação de atividades de manutenção que fornecerão níveis aceitáveis de operacionalidade, com um nível aceitável de riscos, sendo eficiente e de baixo custo.

De acordo com Siqueira (2014), a MCC procura responder corretamente um conjunto de questões em uma ordem específica, aplicadas ao objeto de estudo de manutenção.

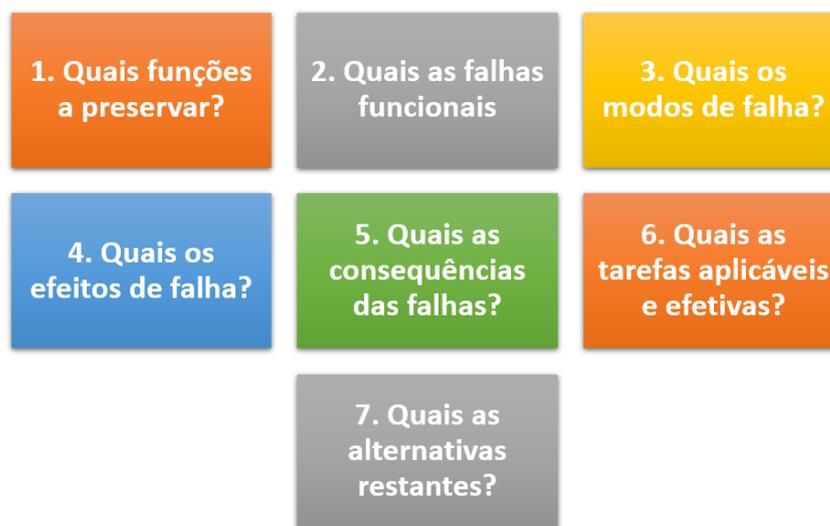


Figura 5. Questões aplicáveis ao sistema objeto da manutenção.

Adaptado de Siqueira (2014).

Segundo o autor, a metodologia para implantação do MCC se dá em sete etapas, assim descritas:

- 1ª Etapa: Seleção do Sistema e Coleta de Informações

Objetiva-se a identificação e documentação dos sistemas e processos que serão analisados. Nesta etapa são descritos os sistemas, o contexto operacional, a hierarquia dos subsistemas e componentes, além dos diagramas de funcionamento do sistema.

- 2ª Etapa: Análise de Modos de Falha e Efeitos

Nesta, todas as funções e modos de falha são documentadas, assim como os efeitos gerados por elas. Utiliza-se metodologias como a FMEA, do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*, para identificar as funções desempenhadas pelo sistema e as falhas associadas a cada função, a origem dos modos de falha, os efeitos e severidade provocados pelas falhas.

- 3ª Etapa: Seleção de Funções Significantes

A terceira etapa tem como objetivo analisar qual ou quais falhas listadas na etapa anterior tem efeitos significantes, considerando nos aspectos da MCC: segurança, meio

ambiente, operação e economia do processo. A análise da severidade da etapa anterior é utilizada para uma classificação segundo o grau de significância. As funções significantes encontradas nesta etapa são submetidas às novas fases do estudo, as demais funções determinadas não significantes são documentadas e analisadas somente até esta etapa.

- 4ª Etapa: Seleção de Atividades Aplicáveis

Na etapa de Seleção de Atividades, definem-se as tarefas de manutenção preventiva que sejam tecnicamente aplicáveis, com o objetivo de prevenir, corrigir ou amenizar os efeitos cada modo de falha. Desta etapa, uma das seguintes três opções a seguir é determinada:

- Manutenção preventiva é aplicável;
- Manutenção preventiva não é aplicável;
- Outra ação alternativa (default) é sugerida.

Caso a manutenção preventiva for aplicável, será específica dos meios instrumentais e da tecnologia utilizada. Para a ação *default*, se a manutenção preventiva não for aplicável, critérios precisos são estabelecidos pela MCC.

- 5ª Etapa: Avaliação da Efetividade das Atividades

Para a quinta etapa, é analisado se uma manutenção preventiva é capaz de reduzir, em níveis aceitáveis, os efeitos de uma falha. Nota-se que, uma atividade pode ser classificada como aplicável tecnicamente na quarta etapa, mas não efetiva economicamente e operacionalmente na quinta etapa, vetando sua utilização. Como resultado deste processo, uma opção das seguintes é escolhida:

- Manutenção preventiva é recomendada;
- Manutenção preventiva é desnecessária;
- Outra ação alternativa (default) é sugerida.

- 6ª Etapa: Seleção das Atividades Aplicáveis e Efetivas

Nesta, determina-se qual a melhor tarefa, baseando-se quais os Resultados do Processo, os Impactos Operacionais, a Segurança Física e os Impactos Ambientais da

tarefa. Ao final deste processo, resume-se a lista de atividades que irão compor o Plano de Manutenção de cada item analisado.

- 7ª Etapa: Definição da Periodicidade das Atividades

Por fim, a sétima etapa estabelece os métodos e critérios para a definição da periodicidade de execução das ações escolhidas. São utilizadas análises de confiabilidade, manutenibilidade, produtividade e a otimização para determinar o intervalo ótimo de execução dos planos de manutenção.

### 2.7.1. Identificação das Falhas

Como descrito anteriormente, uma falha é definida como a perda de uma função. Já uma falha funcional é a incapacidade de qualquer item atingir o desempenho esperado. Segundo Lafraia (2002) o objetivo da MCC é preservar as funções do sistema e não necessariamente somente preservar o equipamento. Como as funções não são todas iguais, as falhas devem ser priorizadas devido às consequências da perda de função do item. A Figura 6 apresenta as diferentes visões de falha para um mesmo problema.

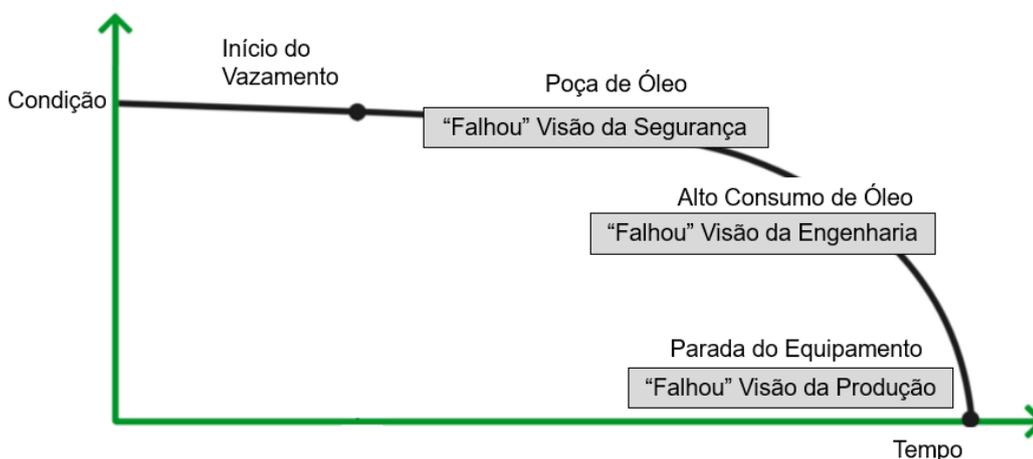


Figura 6. Diversas visões de uma Falha.

Adaptado de Lafraia (2004).

Desta forma, a identificação, classificação e documentação das falhas são realizadas através da Análise de Modos de Falha e Efeitos. Assim, um estudo de FMEA deve envolver, para uma instalação, a identificação das seguintes características de cada função:

- Função – objetivo, com o nível de performance determinado;
- Falha Funcional – perda da função ou desvio funcional;
- Modo de Falha – o que pode falhar;
- Causa da Falha – porque ocorre a falha;
- Efeito da Falha – impacto resultante na função principal;
- Criticidade – severidade do efeito.

## 2.8. Parâmetros da Confiabilidade

Na utilização da manutenção centrada em confiabilidade, pode-se medir a parâmetros da vida de sistemas e componentes. Segundo Fogliatto e Duarte (2011), a determinação da probabilidade de um sistema não falhar em um intervalo de tempo é possível através da modelagem dos dados de tempos até falha da unidade em análise.

Ao entender a distribuição de probabilidade que se ajusta a esses tempos, pode-se estimar a probabilidade de sobrevivência do sistema para qualquer tempo. As medidas mais comuns de confiabilidade para sistemas não reparáveis são: função probabilidade acumulada  $F(t)$ , função densidade de probabilidade  $f(t)$ , função de confiabilidade  $R(t)$  e função de risco  $h(t)$ .

Considera-se que o tempo até a falha de um componente está distribuído de forma aleatória e contínua no tempo, com densidade de probabilidade dada por  $f(t)$ .

### 2.8.1. Função de Probabilidade Acumulada

A função  $F(t)$  apresenta a probabilidade de falha do sistema em operação durante um intervalo de tempo menor ou igual a  $t$ , exemplificada na Eq. (7).

$$F(t) = \int_0^t f(u) du, \quad t > 0 \quad (7)$$

### 2.8.2. Função Densidade de Probabilidade

A função densidade de falhas  $f(t)$ , representada pela Eq. (8) demonstra a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo.

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) \quad (8)$$

### 2.8.3. Função de Confiabilidade

A função de confiabilidade ou função de sobrevivência, apresentada na Eq. (9), informa a probabilidade de o sistema operar sem a ocorrência de falhas durante o intervalo de tempo entre o início de operação até o momento analisado  $t$ .

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u)du = \int_t^{+\infty} f(u)du \quad (9)$$

### 2.8.4. Função de Risco

A função de risco ou também chamada taxa de falha, apresenta a quantidade de risco envolvido em um determinado tempo  $t$  analisado. É utilizada para analisar o risco que um sistema está exposto ao longo de um intervalo de tempo, conforme apresentada na Eq. (10).

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (10)$$

Basicamente três classificações são apresentadas pela função de risco: função de risco crescente, onde a incidência do risco cresce ao longo do tempo, função de risco decrescente e a função de risco estacionária. Segundo Fogliatto e Duarte (2011), produtos manufaturados costumam apresentar uma função de risco característica da ocorrência das três fases descritas acima, conhecida como a curva da banheira.

A curva da banheira representa as fases da vida de um componente. Na Figura 7, são representados três períodos característicos, sendo: mortalidade infantil, período de vida útil e o período de desgaste.

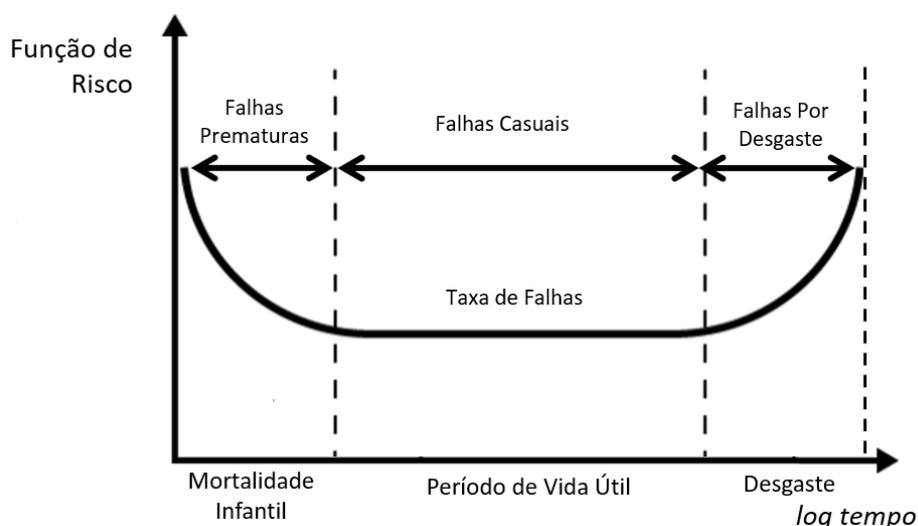


Figura 7. Curva da Banheira.

Adaptado de Fogliatto e Duarte (2011).

Na mortalidade infantil, ocorrem as falhas consideradas prematuras, onde a taxa de falhas é decrescente. As causas destas falhas podem ser ocasionadas por defeitos de fabricação, materiais fora de especificação, falta de mão-de-obra qualificada, erro humano, dentre outras.

A vida útil do equipamento é caracterizada pela taxa constante de falhas. Geralmente, o modo de falha é aleatório, podendo ser difícil evitar a ocorrência destes problemas. Algumas causas destas falhas são erros humanos durante o uso, aplicação indevida, fenômenos naturais não previstos, fator de segurança insuficiente, dentre outros.

Já o período de desgaste é marcado pelo início do fim da vida útil do equipamento, onde observa-se que a taxa de falhas é crescente. Causas como o desgaste, fadiga, corrosão e deterioração do equipamento, dentre outras, são responsáveis pelas falhas neste período.

## 2.9. Distribuições de Probabilidade – Sistemas não reparáveis

Conforme discutido anteriormente, o conceito de confiabilidade é representado pela probabilidade de um sistema sobreviver, ou seja, não falhar, durante um intervalo de tempo  $t$ . Então, a partir do estudo das distribuições de probabilidade que mais se encaixam aos dados de falhas dos sistemas, é possível estimar diversos índices de confiabilidade como a probabilidade de sobrevivência para qualquer tempo  $t$ , tempo médio até a falha e sua função

de risco. Desta forma, são descritas três distribuições de probabilidade usadas geralmente nos estudos de confiabilidade, sendo estas: distribuição Exponencial, Weibull e Lognormal.

### 2.9.1. Distribuição Exponencial

Esta distribuição apresenta função de risco constante, onde sua simplicidade matemática difundiu seu uso às vezes inadequado. Suas representações das funções densidade de falhas, confiabilidade e taxa de falhas para  $t \geq 0$  são apresentadas nas Eq. (11) Eq. (12) Eq. (13), respectivamente.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (11)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (12)$$

$$h(t) = \lambda \quad (13)$$

Onde  $\lambda$  é parâmetro da distribuição, podendo dar diferentes aspectos à função, sendo estimado a partir dos dados de tempo até a falha e  $t$  é tempo até a falha.

### 2.9.2. Distribuição Weibull

Segundo Flogiatto e Ribeiro (2011), a distribuição de Weibull é uma das mais apropriadas para a modelagem dos tempos até a falha. É importante na modelagem de confiabilidade pela sua capacidade de representação de amostras de tempos até a falha com comportamentos distintos.

A distribuição de Weibull é capaz de modelar adequadamente uma grande variedade de situações onde unidades apresentam funções de risco distintas, apresentando funções de risco constante, crescente e decrescente. O modelo de Weibull também pode ser indicado para a análise do comportamento de sistemas onde as falhas nascem da competição de diversos modos de falha. Logo, as funções modeladas pela distribuição de Weibull são apresentadas nas Eq. (14), Eq. (15) e Eq. (16), respectivamente.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (14)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (15)$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (16)$$

Onde  $\eta$  é o parâmetro de escala,  $\beta$  é o parâmetro de forma e  $t$  sendo o tempo até a falha.

Segundo Dodson e Schwab (2021), o parâmetro de escala  $\eta$  define o alcance da função, podendo desta forma concentrar os dados em torno de uma região ou espaçar a distribuição apresentada. Neste caso, também é conhecido como vida característica, onde 63,2% de todos valores estão abaixo da vida característica, independentemente do valor do parâmetro de forma, ou seja, representa a vida na qual 63,2% das falhas ocorrem. A Figura 8 apresenta a influência da variação do parâmetro de escala na função densidade de probabilidade.

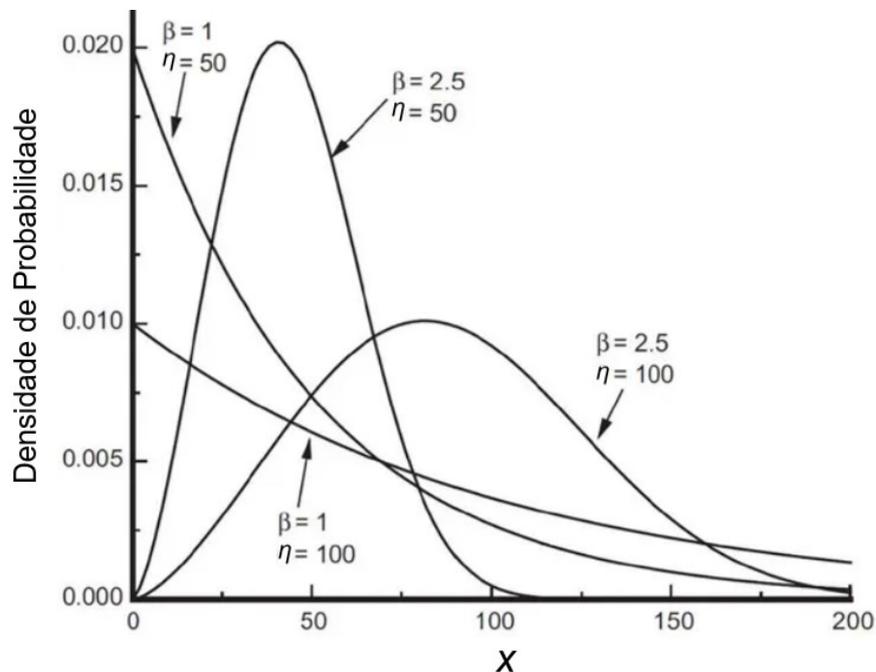


Figura 8 - Influência parâmetro de escala.

Adaptado de Dodson e Schwab (2021).

O parâmetro de forma pode definir a distribuição de diferentes modos, de acordo com os dados utilizados. Se  $\beta = 1$ , a distribuição de Weibull é idêntica à distribuição exponencial. Caso  $\beta = 2$ , a distribuição se assemelha à de Rayleigh.

Caso  $\beta$  está entre 3 e 4, a distribuição se aproxima a uma distribuição normal e conforme maior  $\beta$ , a distribuição de Weibull mais se aproxima de uma lognormal. (Dodson e Schwab, 2021). A Figura 9 apresenta a influência do parâmetro de forma para diferentes valores.

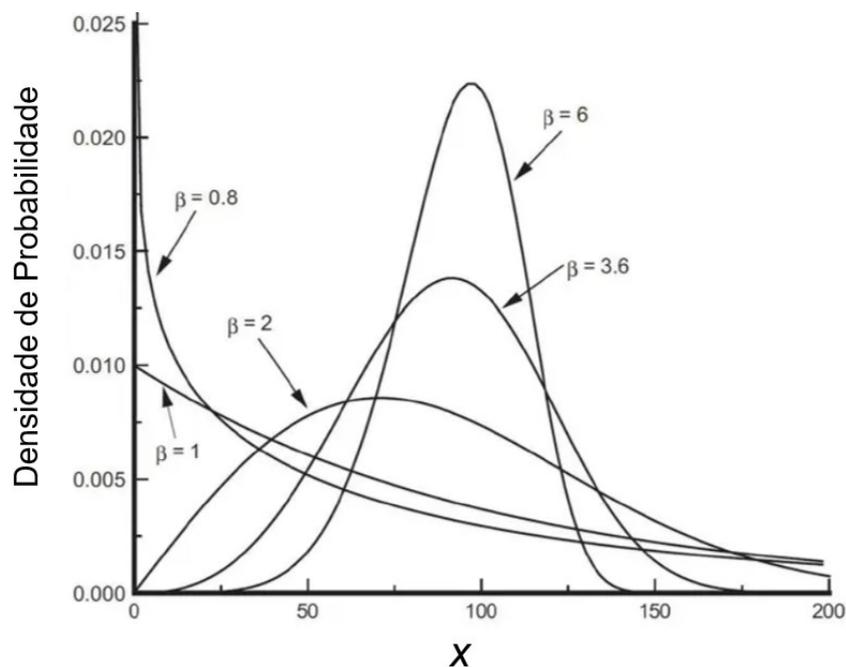


Figura 9 - Influência parâmetro de forma.

Adaptado de Dodson e Schwab (2021).

Ainda segundo Dodson e Schwab (2021), o parâmetro de forma também determina a função de risco ou taxa de falha da distribuição de Weibull quando,  $\beta < 1$ , a função de risco é decrescente, conhecido como período de mortalidade infantil. Quando  $\beta = 1$ , a função é constante e se  $\beta > 1$ , a taxa de falha é crescente, conhecido como o período de falha por desgaste, como é apresentado na Fig. 10.

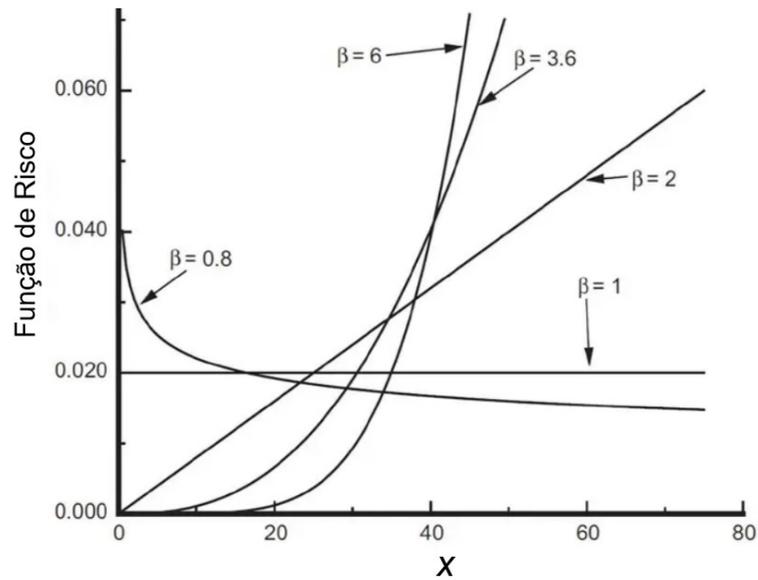


Figura 10 - Influência do parâmetro de forma na função de risco - Distribuição Weibull  
Adaptado de Dodson e Schwab (2021).

### 2.9.3. Distribuição Lognormal

Segundo Flogiatto e Ribeiro (2011), esta é uma distribuição muito utilizada na modelagem de tempos até o reparo de sistema reparáveis. Pode descrever taxas de falhas de desgaste ou prematuras, podendo ser utilizadas em estudos de resistências de materiais ou fadiga de metais. As medidas de confiabilidade são representadas pelas Eq. (17) Eq. (18) Eq. (19), respectivamente.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}t\sigma} e^{\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right]^2\right\}} \quad (17)$$

$$R(t) = \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right) \quad (18)$$

$$h(t) = \frac{\phi\left[\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)\right]/\sigma t}{\Phi\left[\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)\right]} \quad (19)$$

Onde  $\Phi(x)$  é o valor da função de distribuição normal padronizada,  $\phi(x)$  o valor da função densidade da distribuição normal padronizada,  $\mu$  é média do logaritmo do tempo de falha ou parâmetro de escala e  $\sigma$  o desvio padrão ou parâmetro de localização.

### **3. METODOLOGIA**

Este trabalho se dá em uma pesquisa quantitativa, objetivando o entendimento das ações e comportamentos de todo o setor de manutenção automotiva da empresa analisada. Todos os dados utilizados no trabalho foram autorizados e obtidos diretamente da base de informações empresa, que preferiu não se identificar.

#### **3.1. Descrição da Empresa Analisada**

Localizada no estado de Goiás, a usina analisada tem capacidade de moagem de aproximadamente 2.400 toneladas por ano, com base nos dados da última safra ano 2021/2022. A usina possui diversas instalações físicas para a manutenção de seus equipamentos, como:

- Área total da oficina: 50000 m<sup>2</sup>
- Área Construída da Oficina: 4810 m<sup>2</sup>
- Oficina de Colhedoras
- Oficina de Tratores
- Oficina de Caminhões
- Oficina de Reboques
- Oficina de Implementos Agrícolas
- Borracharia
- Rampa de Lubrificação
- Lavador Automotivo
- Oficina de Caldeiraria
- Oficina Hidráulica
- Sala de Elétrica e Automação

#### **3.2. Descrição dos Equipamentos Objetos do Estudo**

Os equipamentos analisados neste trabalho são seis maquinários da classe colhedora de cana-de-açúcar, da fabricante John Deere, modelo CH570, de fabricação nacional, com as seguintes identificações apresentadas na tabela 1:

Tabela 1 - Equipamentos de Estudo

Identificação	Modelo	Ano de Fabricação
10007	CH570	2018
10010	CH570	2018
10011	CH570	2018
10014	CH570	2022
10015	CH570	2022

Conforme apresentado anteriormente, a colheita mecanizada de cana-de-açúcar envolve a utilização de equipamentos responsáveis pelo corte, pré-limpeza e carregamento da cana-de-açúcar em outros equipamentos para o transporte da cana para as usinas, onde será processada. Todo este processo é realizado então pelas colhedoras de cana, onde seus diversos sistemas, apresentados na Fig. 11, são responsáveis por cada uma das etapas da colheita mecanizada de cana-de-açúcar.

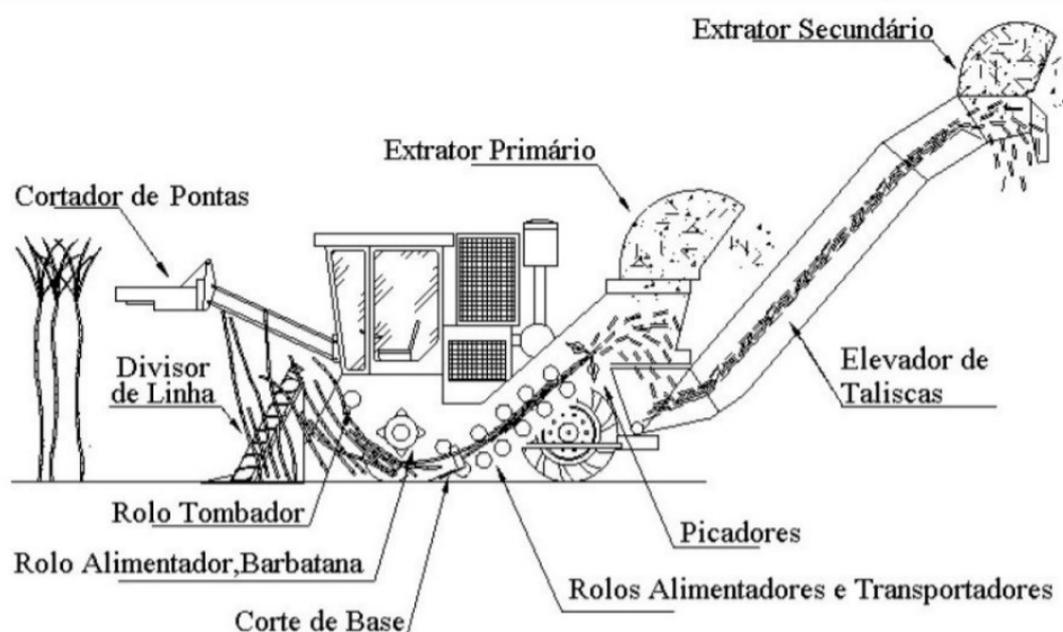


Figura 11. Sistemas Colhedora de Cana-de-Açúcar.

Adaptado de Neves (2003).

### 3.3. Divisão das Colhedoras em Sistemas Principais

Desta forma, para um melhor entendimento das funções de uma colhedora de cana, seus sistemas são divididos e apresentados individualmente a seguir:

- Sistema de Corte de Pontas ou Despontador

A Figura 12 apresenta este sistema que é responsável pelo corte das pontas da cana-de-açúcar, retirando esta região que apresenta maior quantidade de folhas e menor nível de açúcar, desta forma reduzindo a quantidade de impurezas do produto colhido.

É composto por três motores hidráulicos, que movimentam dois tambores coletores, que conduzem a planta para o tambor central, montado com facas de corte para a remoção das pontas da planta.



Figura 12. Corte de Pontas.

- Sistema de Divisor de Linhas

Os divisores de linhas são responsáveis pela separação das linhas de colheita do equipamento, visto que os modelos estudados neste trabalho realizam a colheita de somente uma linha por vez. Estes componentes também realizam o levantamento da cana que esteja tombada, ou deitada, para que seja possível o corte da planta.

É composto por motores hidráulicos que movimentam os rolos divisores de linha, principais e auxiliares, como é visto na Fig. 13.



Figura 13. Divisores de Linha.

- Sistema de Corte de Base

Este sistema realiza o corte da cana na melhor altura possível, para que se alcance o maior aproveitamento de açúcar. Este sistema pode ser regulado automaticamente por sensores ou pelo operador. A Figura 14 apresenta o sistema que é composto por uma caixa de engrenagens que sincroniza o giro dos discos de corte e motores hidráulicos que movimentam as engrenagens.



Figura 14. Corte de Base.

- Sistema de Rolos Alimentadores/Transportadores

Também conhecidos como sistema de rolos industriais, este é responsável pelo direcionamento e transporte da cana inteira, cortada em sua base, para o sistema de picagem da cana. O sistema é composto por rolos superiores e inferiores, movimentados por motores hidráulicos, como é visto na Fig. 15.



Figura 15. Rolos alimentadores.

- Sistema de Picador

O sistema de picador realiza o corte da cana inteira, separando a planta em diversos pedaços. Neste caso, o sistema utiliza-se de facas e contra-facas, montadas em dois rolos giratórios, sincronizados, para a realização do corte com maior precisão possível. Este é um dos sistemas mais significativos do equipamento devido sua condição de operação. É movimentado por um motor hidráulico, instalado em uma caixa de transmissão de engrenagens, chamada usualmente de caixa do picador. A Fig. 16 apresenta o sistema de facas e contra-facas utilizados para a picagem da cana.



Figura 16. Sistema Picador.

- Sistema de Extrator Primário

Após o processo de picagem, a cana-de-açúcar é encaminhada pelo extrator primário, onde um ventilador hidráulico em alta rotação, realiza a sucção de impurezas vegetais tais como folhas e galhos, soprando-as para o solo, a fim de reduzir a quantidade de impurezas presentes no produto final a ser entregue à usina, visto na Fig. 17.



Figura 17. Extrator Primário.

- Sistema Elevador

Após a pré-limpeza, a cana picada segue para o sistema de elevador, apresentado na Fig. 18, que eleva o produto em um sistema de esteira e taliscas, até a altura necessária para ser despejada em outros equipamentos que realizam o transporte da cana colhida para as usinas.



Figura 18. Sistema Elevador.

- Sistema Extrator Secundário

Semelhante ao extrator primário, o extrator secundário é composto por um outro ventilador hidráulico que realiza uma limpeza extra no produto colhido, a fim de retirar mais impurezas da cana que seguirá para processamento na usina, visualizado na Fig. 19.



Figura 19. Extrator Secundário.

- Sistema Rodante

A Figura 20 apresenta o sistema rodante que é responsável pela movimentação da colhedora. Composto por um sistema de roletes e esteira rodante, é conduzido por um motor hidráulico, que impulsiona o aro motriz, dando movimento ao conjunto rodante. É um sistema crítico do equipamento devido à sua condição de operação, em que os custos de manutenção e o tempo de parada são usualmente superiores quando comparados aos outros sistemas.



Figura 20. Sistema Rodante.

- Sistema de Geração de Potência

Este sistema é composto pelo motor de 9,0 litros de combustão interna, a diesel, produzindo uma potência de aproximadamente 342 cavalos. Na Figura 21, o motor é acoplado à uma caixa de engrenagens chamada usualmente de caixa quatro furos, onde são acopladas as bombas hidráulicas responsáveis por toda a movimentação dos sistemas do equipamento.



Figura 21. Sistema de Geração de Potência.

- Sistema Hidráulico

É composto por todos componentes hidráulicos do equipamento, sendo mangueiras hidráulicas, acumuladores hidráulicos, motores e bombas hidráulicas. Este sistema é responsável por todo bombeamento hidráulico e movimentação dos sistemas da colhedora de cana. A Figura 22 apresenta o conjunto de bombas hidráulicas.



Figura 22. Sistema Hidráulico.

- Sistema de Estação de Operação

É responsável pela acomodação do operador do equipamento, onde todos os movimentos da colhedora são comandados neste local, conforme é visto na Fig. 23.



Figura 23. Estação de Operação.

### 3.4. Fluxo de Manutenção

São utilizados dois tipos de documentos base para o fluxo de manutenção, sendo as notas de serviço e as ordens de serviço.

#### 3.4.1. Notas de Serviço

As notas podem se dividir entre notas de Registro de Avaria (RA), onde são abertos registros de falhas que aconteceram com o equipamento, ocasionando a parada de produção da colhedora ou a perda de uma função do equipamento. São utilizadas também notas preventivas (PV) onde somente são informadas as situações do equipamento que não provocaram a parada ou perda de função, porém podem ser documentadas e informadas ao controle de manutenção.

As notas somente são utilizadas para a documentação e alerta da situação em que o equipamento se encontra, não sendo documentos que provocam a atuação do time de manutenção. A execução das atividades de manutenção é realizada com base nas Ordens de Serviço.

### 3.4.2. Ordens de Serviço

As ordens de serviço por outro lado, são os documentos de ação da manutenção, em que estes provocam a atuação do time de manutenção no equipamento. As ordens de serviço podem ser divididas em 5 classes:

- Ordens de Manutenção Preventiva;
- Ordens de Manutenção Preditiva;
- Ordens de Manutenção Corretiva não Programada;
- Ordens de Manutenção Corretiva Programada.

As ordens de manutenção preventiva se concentram nem ajustes e calibração dos equipamentos, troca preventiva de componentes, lubrificação, troca de óleo e filtros, e também em atividades de inspeção preventiva para a avaliação das condições do equipamento e possíveis oportunidades de atuação da manutenção.

Ordens de manutenção preditiva são responsáveis por todas atividades como análises de óleo dos equipamentos, análises de vibração e medições de desgaste de componentes mecânicos. As ordens de manutenção corretiva não programada são geradas devido à necessidade de manutenção onde a falha não foi captada preventivamente e é necessária a intervenção no equipamento.

Ordens de manutenção corretiva programada são utilizadas para a execução de serviços de manutenção corrigindo falhas captadas em atividades preventivas ou podem também ser geradas a partir das atividades preditivas realizadas. Todas estas informações são armazenadas no software SAP (*Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung*), em português Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados.

### 3.4.3. Desenvolvimento do Trabalho

Para a realização das análises presentes neste trabalho, foram coletadas as ordens e notas de manutenção durante o período do início da safra 2022/2023 em março de 2023 até novembro de 2023, próximo do fim da safra. São analisadas as ordens de manutenção preventivas e preditivas e as ordens de manutenção corretiva programada e não programada. Identificando as notas e ordens de serviço executadas, separando-as pelos sistemas dos equipamentos, pode-se avaliar a quantidade e qualidade da manutenção, calculando os índices de manutenção previamente discutidos neste trabalho.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com as informações levantadas na empresa como ordens de serviço e falhas dos equipamentos, foi possível o desenvolvimento das métricas discutidas neste trabalho e a análise dos indicadores de acordo com o contexto de cada equipamento.

### 4.1. Paretos de Falhas

Baseando-se no princípio de pareto, é possível identificar os problemas mais vitais dos equipamentos, permitindo ao time de manutenção o direcionamento das atividades para as principais causas de paradas dos equipamentos. Aliada à análise dos tempos de parada, pode-se elencar quais componentes e sistemas requerem maior atenção do time de manutenção. A Figura 24 a seguir apresenta o pareto de falhas desenvolvido a partir dos dados obtidos para a colhedora 10007.

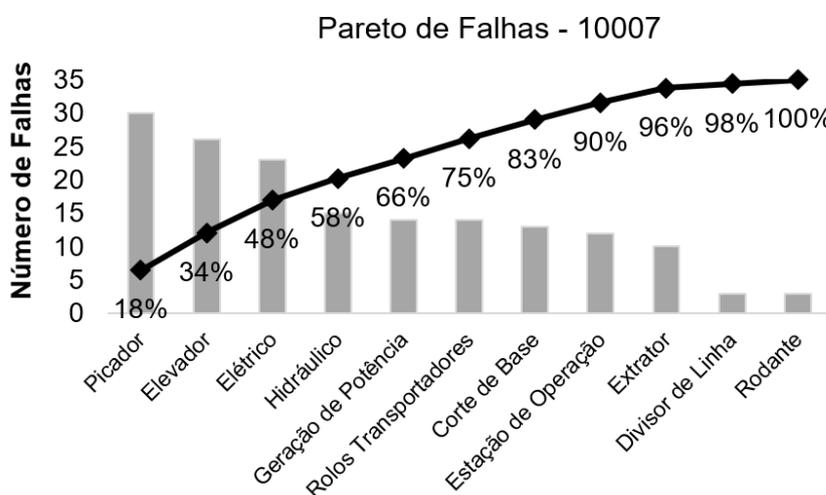


Figura 24. Pareto de falhas - Frota 10007.

Na figura acima, observa-se que o sistema de picador apresentou o maior número de falhas, representando 18 % da quantidade total de falhas do equipamento. O sistema de elevador é o segundo sistema com maior número de falhas onde juntamente com o sistema de picador apresentam 34 % de todas as falhas da colhedora. Neste caso, não é observado um destaque de sistema com número bastante superior quando comparado aos outros sistemas.

Na Figura 25 a seguir, para a colhedora 10010, observa-se que o sistema de picador também apresentou o maior número de falhas, representando 19 % da quantidade total de falhas do equipamento, seguido pelo sistema de geração de potência, com esses dois sistemas totalizando 35% do total de falhas do equipamento. E como na colhedora 10007, não se observa uma disparidade entre os sistemas que mais falharam do equipamento.

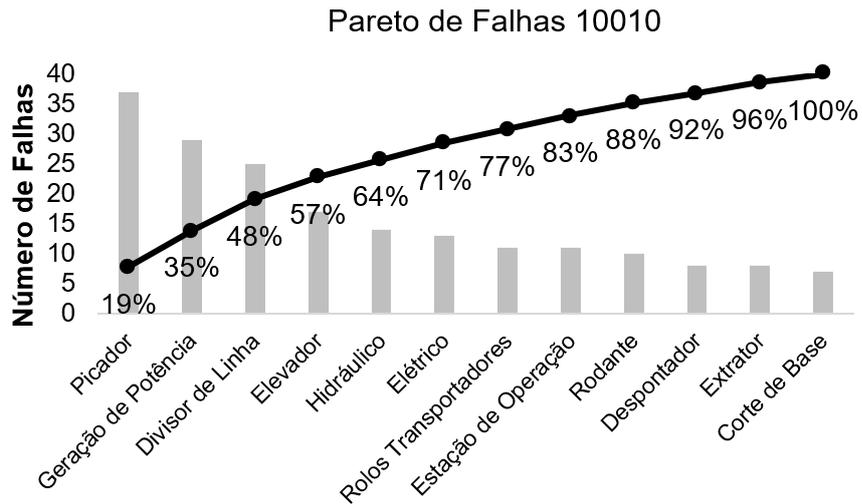


Figura 25. Pareto de falhas - Frota 10010.

Na Figura 26, para a colhedora 10011 observa-se que o sistema de picador também é crítico para o equipamento, representando 19 % da quantidade total de falhas, seguido pelo sistema de geração de potência, com esses dois sistemas totalizando cerca 33 % do total de falhas da colhedora.

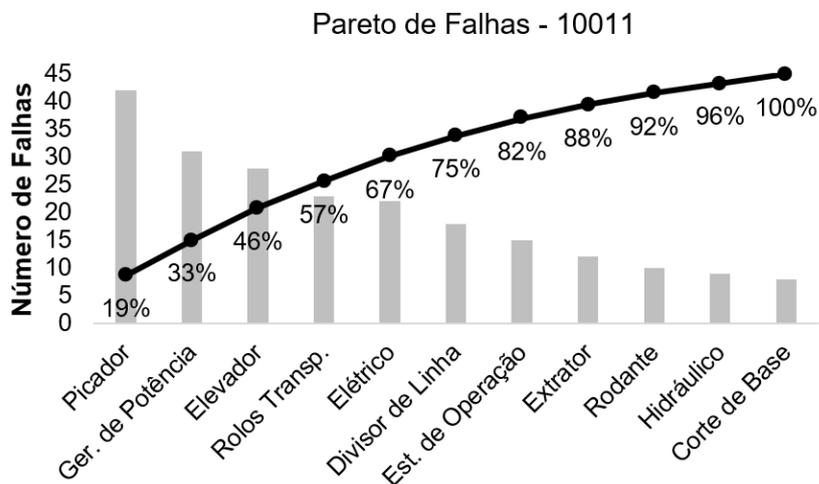


Figura 26. Pareto de falhas - Frota 10011.

Para a colhedora 10014, a Figura 27 mostra que o sistema de picador também apresenta o maior número de falhas, cerca 27 % da quantidade total de falhas do equipamento. Em seguida com segundo maior número de falhas, o sistema de elevador representa, juntamente com o sistema de picador 43 % das falhas do equipamento. Neste caso, já é possível indentificar que o sistema de picador apresenta uma relação de falhas maior em comparação aos outros sistemas.

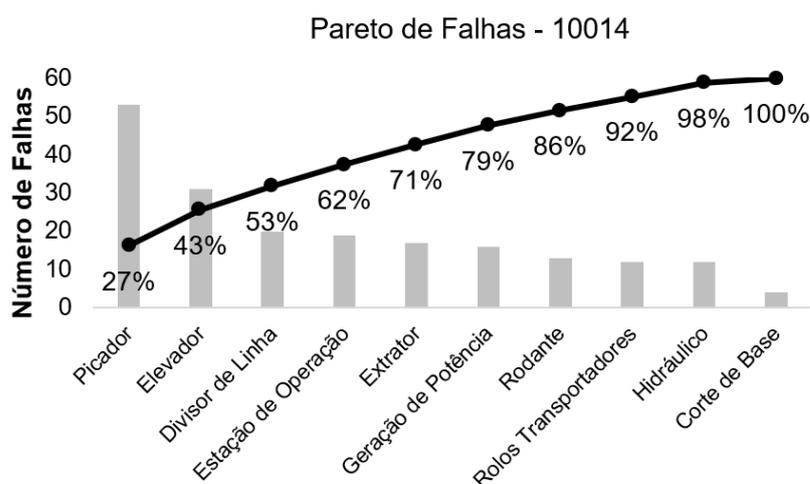


Figura 27. Pareto de falhas - Frota 10014.

Para a colhedora 10015, nota-se na Figura 28 que o sistema de picador apresenta o maior número de falhas, cerca 28 % da quantidade total de falhas do equipamento. Em sequência, o sistema com segundo maior número de falhas é o sistema de divisor de linha, em que juntamente com o sistema de picador, representam 42 % das falhas do equipamento. De forma similar à colhedora 10014, o equipamento 10015 apresentou uma quantidade de falhas significativamente maior no sistema picador, em relação aos outros sistemas da colhedora.

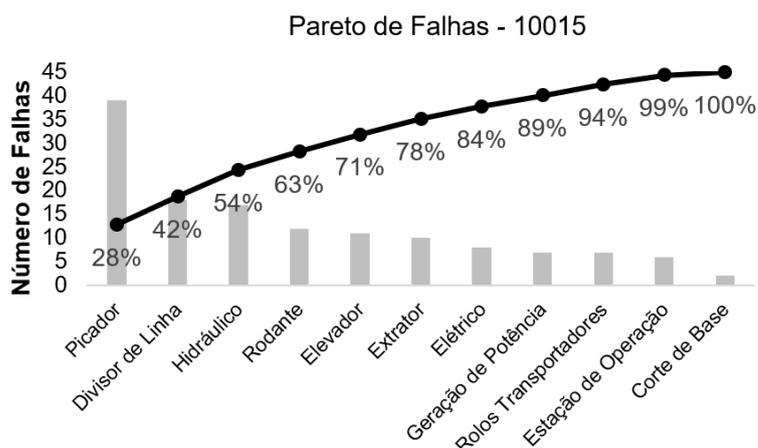


Figura 28. Pareto de falhas - Frota 10015.

Desta forma, observa-se que o sistema que apresentou maior número de falhas é o sistema de picador, mais nitidamente em equipamentos mais novos como as colhedoras 10014 e 10015. Assim, é possível indicar este sistema como um ponto focal para as análises do time de manutenção, propondo estudos de falhas e planos de manutenção para o sistema. No decorrer do trabalho, será apresentado o estudo de confiabilidade deste sistema.

#### 4.2. MTBF/MTTR

Conforme discutido anteriormente, os indicadores MTBF e MTTR mensuram os impactos das falhas dos equipamentos em sua produção, em que um maior MTBF indica maior tempo disponível do equipamento à operação e um MTTR menor indica que as falhas ocorridas causaram menores impactos na produção do equipamento. A Tabela 2 demonstra estes indicadores para as cinco máquinas analisadas.

Tabela 2 - MTBF e MTTR

Equipamento	MTBF (horas)	MTTR (horas)
10007	15,56	2,51
10010	11,31	4,87
10011	13,24	4,53
10014	14,94	1,66
10015	23,13	1,95

Observa-se que equipamentos mais novos (10014 e 10015) apresentaram menores tempos para reparo, indicando que suas falhas foram de menor complexidade e menor impacto na produção. Entretanto é visto que o tempo médio entre falhas da colhedora 10014 é inferior ao MTBF da colhedora 10015, indicando uma frequência de falhas maior. Como esperado, equipamentos mais velhos como as colhedoras 10010 e 10011 apresentaram menor MTBF e maior MTTR, devido ao seu período de utilização e o desgaste dos seus componentes. Entretanto, observa-se que a colhedora 10007 apresentou indicadores melhores quando comparadas às máquinas de mesma idade, podendo indicar assim melhores condições operacionais e manutenções de maior qualidade.

### 4.3. Disponibilidade Física de Máquinas

A disponibilidade apresenta em porcentagem de tempo, a quantidade de horas em que o equipamento esteve disponível para a operação, considerando todo o período analisado. Com base nas horas de operação e a duração das manutenções executadas no equipamento, a Tab. 3 apresenta a relação de disponibilidade física das cinco máquinas:

Tabela 3 - Disponibilidade Física de Máquinas

Equipamento	Ano de Fabricação	Disponibilidade Física
10007	2018	84 %
10010	2018	73 %
10011	2018	75 %
10014	2022	90 %
10015	2022	90 %

Analisando a tabela nota-se que os equipamentos 10015 e 10014, fabricados em 2022, apresentam uma disponibilidade aproximadamente 15% maior quando comparados aos equipamentos 10010 e 10011, de fabricação em 2018. Desta forma, pode-se observar a relação entre a idade de operação do equipamento e a quantidade de intervenções necessárias, em que uma máquina mais usada apresentaria menor disponibilidade. Entretanto, o equipamento 10007 apresentou uma disponibilidade cerca de 10% maior quando comparado aos equipamentos de mesmo ano de fabricação, porém entende-se que a qualidade das manutenções, preventivas e corretivas, podem ter colaborado para o melhor desempenho deste equipamento.

#### 4.4. Índice de Corretiva/Preventiva

Conforme discutido anteriormente, os diferentes tipos de manutenções aplicados produzem resultados distintos. Desta forma, índice de corretiva é um indicador importante de qual a proporção de manutenção corretiva comparada a todas outras manutenções aplicadas no equipamento. A Tabela 4 apresenta os índices de corretiva para as máquinas analisadas:

Tabela 4 - Índices de Corretiva

Equipamento	Horas de Manutenção Totais	Horas de Manutenção Corretiva	Índice de Corretiva
10007	780	302	39 %
10010	939	367	39 %
10011	897	356	40 %
10014	738	291	39 %
10015	548	243	44 %

De acordo com a Tab. 4, observa-se que as colhedoras apresentam índices de corretiva próximos, com destaque à colhedora 10015, com o maior índice de corretiva. Fator este preocupante devido ser um equipamento novo, onde um maior índice de corretiva demonstra certa falta de controle da manutenção sobre este equipamento.

Desta forma, nota-se que o alto índice de corretiva na manutenção agrícola em geral pode ser explicado pela severidade das condições de operação dos equipamentos em campo, com grande diversidade de fatores que influenciam a performance dos maquinários, diferentemente do caso de equipamentos industriais, onde os ambientes de operação podem ser melhor controlados e adequados para o funcionamento dos componentes

#### 4.5. Confiabilidade Sistemas – Componentes

Em análise do Diagrama de Pareto dos equipamentos do estudo, observa-se que o sistema de picador apresenta o maior número de falhas, representando cerca de 20 % das falhas dos equipamentos 10007, 10010 e 10011, e cerca de 27 % das falhas dos equipamentos mais novos, como as colhedoras 10014 e 10015.

Logo, este é um sistema crítico para o equipamento, suas falhas podem causar impacto significativo na produtividade das máquinas. Com base no histórico de manutenções executadas, a Tab. 5 apresenta a quantidade manutenções e de horas improdutivas dos equipamentos devido ao sistema de picador:

Tabela 5 - Intervenções Sistema Picador

Equipamento	Quantidade de Intervenções	Tempo de parada (h)
10007	30	32
10010	37	228
10011	42	360
10014	53	86
10015	41	49

Conforme apresentado na tabela, é observada a diferença entre os tempos de paradas entre os equipamentos, onde as maiores indisponibilidades ocorreram nos equipamentos 10010 e 10011. Esta disparidade é explicada pela diferença dos modos de falha do sistema de picador.

Como explicado anteriormente, o sistema de picador é composto pelos cilindros de corte de cana onde são montados os facões, e a caixa de transmissão de engrenagens, que dá movimento aos rolos picadores, chamada caixa do picador. As falhas da caixa de engrenagens acarretam uma manutenção mais demorada devido a complexidade dos componentes e de montagem, desta forma aumentando o tempo de parada da colhedora.

Analisando as falhas dos equipamentos, foi identificado que as colhedoras 10011 e 10014 apresentaram falhas na caixa de engrenagens, e por isto, apresentaram os maiores tempo de parada.

Outro modo de falha presente neste sistema é a quebra dos facões de corte de cana, com um número expressivo de ocorrências e menor tempo de manutenção devido à sua simplicidade de correção. Entretanto, conforme apresentado na Tab. 6, mesmo com menor tempo de manutenção, a quantidade de falhas pode afetar a performance dos equipamentos, diminuindo seu tempo médio entre falhas e conseqüentemente a confiabilidade da colhedora.

Tabela 6 - Intervenções nos Facões

Equipamento	Quantidade de Intervenções Facões	Tempo de parada (h)
10007	18	25
10010	19	29
10011	21	36
10014	26	44
10015	24	32

Desta forma, é realizada a análise de confiabilidade dos facões do sistema de picador, buscando o entendimento deste modo de falha e as correlações entre os equipamentos.

Para isto, considera-se o facão de corte como um componente não reparável, em que para seu reparo é realizada a substituição dos facões danificados por novos. Assim, utilizando os dados das falhas obtidas e as distribuições de probabilidade para sistemas não reparáveis, é construída a curva de confiabilidade para este componente.

Para isto, é utilizado o software *Minitab* para a verificação dos modelos mais apropriados para a representação dos dados e estimação dos parâmetros da distribuição utilizada.

#### 4.5.1. Distribuição de Probabilidade

Neste caso, a distribuição que melhor representou os dados foi a distribuição de Weibull. Para a estimação dos parâmetros de escala,  $\eta$  e forma,  $\beta$  demonstrados na Tab. 7, foi utilizado o método da máxima verossimilhança que utiliza os dados das amostras de falha para estimar os parâmetros.

Tabela 7 - Parâmetros Distribuição Weibull

Equipamento	$\eta$	$\beta$
10007	103,92	1,78
10010	105,69	1,72
10011	140,03	1,52
10014	123,78	1,79
10015	130,40	1,19

#### 4.5.2. Confiabilidade Facões do Sistema Picador

Com os parâmetros da distribuição de probabilidade, são construídas as curvas de confiabilidade dos facões do sistema picador para os cinco equipamentos analisados. A Figura 29 apresenta as curvas de confiabilidade para as cinco máquinas estudadas, relacionando a porcentagem de não ocorrência de falhas nos facões do sistema picador em relação ao intervalo de tempo de operação destes componentes.

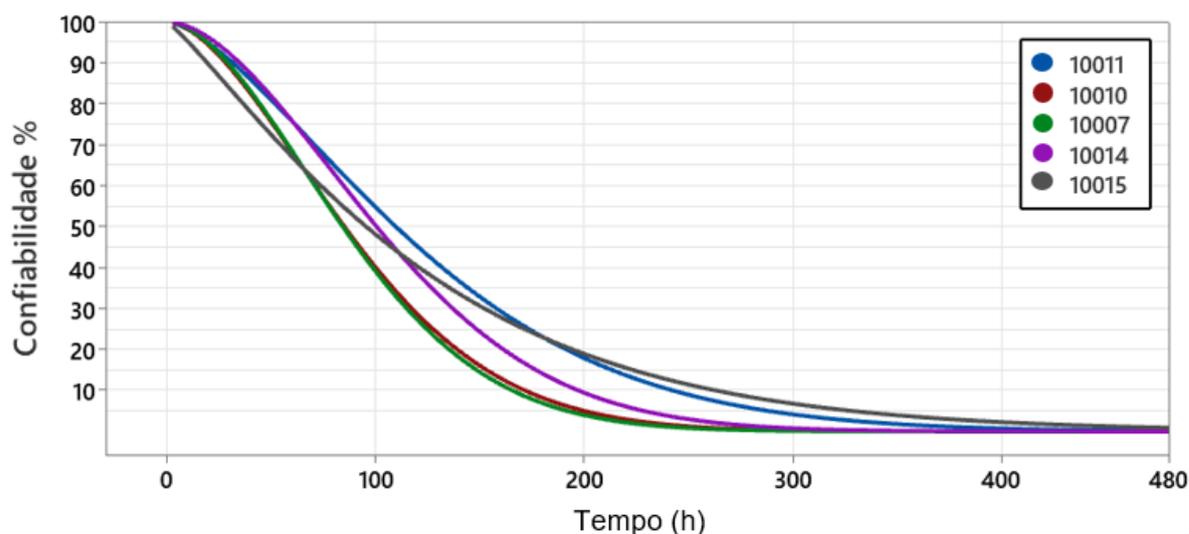


Figura 29 - Confiabilidade Facões

Nota-se que as curvas de confiabilidade se assemelham bastante, principalmente entre as colhedoras com maior tempo de uso, como é o caso das máquinas 10007 e 10010. Estes equipamentos apresentaram os maiores parâmetros de forma  $\beta$ , com maiores índices de confiabilidade no início do intervalo de tempo analisado, porém apresentaram um rápido decaimento de confiabilidade devido à menor vida característica das máquinas analisadas.

O mesmo ocorre com a colhedora 10014, apresentando uma confiabilidade maior durante o início do período de tempo analisado e após isso queda no índice, mas como apresenta vida característica maior que as colhedoras 10007 e 10010, a queda se dá mais suave.

Obseva-se que a colhedora 10011 apresentou alta confiabilidade nos períodos iniciais, e com a maior vida característica, e tem queda sutil da curva de confiabilidade. Diferentemente dos demais, o equipamento 10015 apresentou o menor parâmetro de forma, com a confiabilidade inicial menor quando comparado aos outros equipamentos. Porém, por possuir uma vida característica maior, a confiabilidade se mantém em queda mais sutil.

#### 4.5.3. Taxa de Falhas Facções do Sistema Picador

Aliado à função de confiabilidade, é analisada também a taxa de falha ou função de risco dos componentes estudados. De acordo com a Fig. 30, observa-se o comportamento similar das taxas de falha para os equipamentos 10007, 10010 e 10014. Estas máquinas apresentaram parâmetros de forma aproximados, indicando a falha por desgaste do componente, conforme discutido anteriormente.

Já a colhedora 10011 apresentou um parâmetro de forma  $\beta = 1,52$ , apresentando a taxa de falhas com menor inclinação, entretanto ainda indicando modo de falha por desgaste dos componentes.

Por fim, a colhedora 10015 apresentou o menor valor para o parâmetro de forma  $\beta = 1,19$ , e conseqüentemente a taxa de falhas se aproxima de um comportamento constante durante todo o período de tempo analisado, podendo ter modos de falhas aleatórios como acidentes operacionais devido à impactos de pedras e materiais ferrosos durante a colheita.

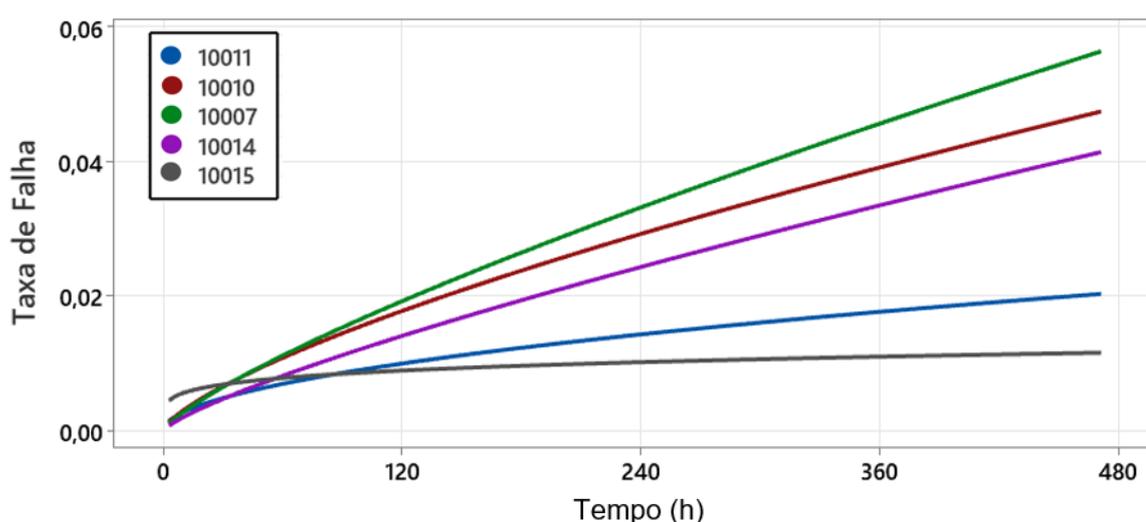


Figura 30 - Taxa de Falhas Facções

Neste caso entende-se que não somente o tempo de uso do equipamento influencia o desempenho dos componentes, mas também fatores como a qualidade da manutenção executada e a condição operacional dos equipamentos podem alterar o desempenho dos sistemas. Como visto nas figuras acima, mesmo colhedoras mais antigas, como a frota 10011, podem apresentar índices de confiabilidade maiores quando comparados à equipamentos mais novos.

As curvas de confiabilidade apresentadas auxiliam a manutenção centrada na confiabilidade, pois a interpretação dos dados gerados pode definir melhores estratégias para a manutenção, como melhores intervalos para a troca de componentes, evitando a falha do equipamento e transformando manutenções corretivas em possíveis paradas programadas, atenuando as paradas de produção e permitindo a melhor programação de manutenção para os equipamentos.

## 5. CONCLUSÃO

O setor de manutenção é de fato um dos pilares para o bom desempenho de uma indústria. Sobretudo no setor de bioenergia, a manutenção agrícola pode se apresentar bastante complexa, com diversos fatores influenciando o desempenho dos maquinários agrícolas. Desta forma, a boa gestão da manutenção é capaz de além de economizar recursos, manter a operação dos equipamentos e sobretudo dar mais segurança aos colaboradores que atuam nas mais diversas operações. A aplicação de novas estratégias como a manutenção centrada na confiabilidade, permitem a melhor divisão e organização das tarefas de manutenção, definindo também as métricas a serem alcançadas pelo setor.

Assim, conclui-se que o estudo cumpriu com os objetivos, onde são levantados os dados pertinentes as colhedoras de cana-de-açúcar estudadas, analisando e medindo com base nos índices de manutenção e na MCC, a performance dos equipamentos e justificando as diferenças entre os resultados apresentados. São definidos os sistemas que compõem as máquinas e os impactos causados pelas falhas destes sistemas. É possível analisar os indicadores e discutir as diferenças entre os resultados encontrados, em que mesmo para equipamentos de mesmo tempo de uso, foram encontradas variações de desempenho de operação. O contexto operacional dos equipamentos, como a qualidade dos operadores das máquinas juntamente com o ambiente onde o equipamento é utilizado é um dos motivos para tais diferenças encontradas nos indicadores de manutenção. Outro ponto levantado é a quantidade e qualidade das manutenções realizadas, sendo encontrados indicadores que apontam para insuficiência de atividades preventivas de manutenção.

O estudo de confiabilidade realizado sobre os facões de corte do sistema de picador pode indicar um intervalo de troca preventiva para estes componentes, prevenindo a quebra não programada destes componentes. Pode-se aprofundar neste estudo devido às condições de operação do equipamento, juntamente com uma análise dos sistemas completos das colhedoras, considerando-os componentes reparáveis e comparar os resultados de desempenho dos equipamentos.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Confiabilidade e Manutenibilidade** – Terminologia (NBR 5462). Rio de Janeiro, ABNT, 1994.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, v10 – Safra 2022/23, n. 4 - Quarto levantamento, 2023.

DODSON, B.; SCHWAB, H. **Accelerated testing: a practitioner's guide to accelerated and reliability testing**. 2ª Edição, Warrendale, SAE International, 2021.

FLOGIATTO, F.S; DUARTE, J.L.R. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Elsevier, Rio de Janeiro, ABEPRO, 2011.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. 3ª Edição. São Paulo, Qualitymark, 2009.

LAFRAIA, J. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2001.

L.H. Crow: **Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems**. AMSAA -Army Materiel Systems Analysis Activity, 1975. Relatório.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered Maintenance RCM II**. 2ª Edição. Nova York, Industrial Press, 1997.

MIRSHAWKA, V.; OLMEDO, N. C. **Manutenção – combate aos custos na não-eficácia – a vez do Brasil**. São Paulo, Makron Book, 1993.

NEVES, J.L.M. **Avaliação de perdas invisíveis em colhedoras de cana-de-açúcar e alternativas para sua redução**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

NASCIF, J. **Manutenção de Classe Mundial**, *Revista Manutenção e Qualidade*, n.29, p.8, 2000.

SIQUEIRA, Iony Patriota de. **Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

VIANA, H. R. G. *PCM, Planejamento e Controle de Manutenção*. Rio de Janeiro, Quality Mark, 2002.

Colhedora de Cana CH570 – John Deere. Disponível em: <https://www.deere.com.br/pt/colheitadeiras/colhedora-de-cana/ch570/>. Acesso em outubro de 2023.

John Deere Parts Catalog. Disponível em: <https://partscatalog.deere.com/jdrc/search>. Acesso em outubro de 2023.