



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

ANDRÉ DINIZ SILVA BRITO

**ESTUDO DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE COLHEDORAS DE CANA-DE-
AÇÚCAR**

TERESINA-PI

2024

ANDRÉ DINIZ SILVA BRITO

ESTUDO DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE COLHEDORAS DE CANA-DE-
AÇÚCAR

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do curso de Engenharia Mecânica, do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí, Campus Teresina Central.

Orientador: Prof. Me. Edivaldo Feitosa Pereira.

TERESINA-PI

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Brito, André Diniz Silva

B862e Estudo da confiabilidade de sistemas de colhedoras de cana-de-açúcar /
André Diniz Silva Brito. - 2024.
52 f.: il. p&b.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2024.

Orientador : Prof Me. Edivaldo Feitosa Pereira .

1. Confiabilidade. 2. Distribuição de probabilidade. 3. Colhedora. 4.
Manutenção. I.Título.

CDD - 620

Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631

ANDRÉ DINIZ SILVA BRITO

ESTUDO DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE COLHEDORAS DE CANA-DE-
AÇÚCAR

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do curso de Engenharia Mecânica, do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí, Campus Teresina Central.

Aprovada em: 11/09/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Edivaldo Feitosa Pereira
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI
Orientador(a)

Prof. Me. Edivaldo Feitosa Pereira Filho
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI
Avaliador(a)

Prof. Dra. Jayna Katia Dionisio dos Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI
Avaliador(a)

Ao Senhor, detentor de toda glória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, pois essa é a vontade de Deus para aqueles que estão em Cristo Jesus. Em segundo lugar, aos meus pais Alex Sandro Gomes Brito e Marilene Diniz Silva Brito, por todo amor, ensinamentos e incentivos que se transformaram em forças em minha vida e me fizeram iniciar e não desistir da minha formação. Em conjunto, agradeço também, aos meus irmãos Alex Sandro Gomes Brito Junior e Rebeca Diniz Silva Brito por todo amor, apoio e companheirismo em todos os momentos que necessitei. Agradeço aos meus avós e todos os meus familiares. Ademais, sou muito grato à minha noiva Bianca Alessandra Pires Postigo, por orar, jejuar, confiar, sorrir, chorar, compartilhar e viver comigo todos os planos de Deus para nossas vidas. Aos meus amigos e colegas que fiz na instituição, Giovanni Gama, Matheus Borges, Luiz Felipe, Lucas Rodrigues, Jordan Mateus, Nilson Gabriel e José Lemos, pois os anos de estudos juntos e os momentos vividos dentro do curso me ajudaram a chegar até aqui. Aos meus irmãos na fé, Neto, Milena, Luciano, Bruna, Marcão, Graziela, Mateus e Lilia, que tem cooperado comigo desde o início da minha vida em Cristo. Ao meu irmão na fé, Higo Muniz (*in memoriam*) que está agora com Cristo. Meus agradecimentos também vão à Natalia, Rafa e Miguel, meus queridos irmãos que me ensinaram com suas vidas a perseverar em Cristo mesmo em momento de perda. Por fim, agradeço aos meus pastores Alan Donha e Laura Donha, por todo conselho e direcionamento na minha caminhada cristã.

“Dai graças ao Senhor, porque ele é bom. O seu amor dura para sempre.”

Salmos 136:1

RESUMO

A constante procura por aumento na safra de cana-de-açúcar e lucro resultou em novas exigências para o setor industrial, levando as colhedoras de cana a se tornarem cada vez mais dependentes de tecnologias de controle e automação. Ao mesmo tempo, surge a necessidade de diminuir a ocorrência de falhas nesses maquinários, as quais elevam os gastos de produção. Entretanto, a adoção de novos métodos deve ser pesquisada a montante para garantir que os objetivos almejados pela equipe de manutenção sejam alcançados. Nesse sentido, este trabalho apresenta um estudo de caso, explicando os conceitos e aplicando a análise de confiabilidade da manutenção, a partir da coleta de dados de cinquenta colhedoras de cana-de-açúcar de uma empresa de bioenergia. Além disso, são apresentados resultados de confiabilidade de cada sistema veicular das colhedoras analisadas com a construção do diagrama de blocos de confiabilidade, conforme o modelo exponencial de distribuição de probabilidade de falha, identificando componentes críticos do equipamento e apresentando estratégias para prevenir falhas imprevistas deste componente, permitindo assim melhorar o desempenho do equipamento.

Palavras-Chave: confiabilidade; distribuição de probabilidade; colhedora; manutenção; cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The constant demand for an increase in the sugarcane harvest and profit has resulted in new demands for the industrial sector, leading sugarcane harvesters to become increasingly dependent on control and automation technologies. At the same time, there is a need to reduce the occurrence of failures in these machines, which increase production costs. However, the adoption of new methods must be researched upstream to ensure that the objectives sought by the maintenance team are achieved. In this sense, this work presents a case study, explaining the concepts and applying the maintenance reliability analysis, from the collection of data from fifty sugarcane harvesters of a bioenergy company. In addition, reliability results of each vehicle system of the analyzed harvesters are presented with the construction of the reliability block diagram, according to the exponential model of failure probability distribution, identifying critical components of the equipment and presenting strategies to prevent unforeseen failures of this component, thus allowing to improve the performance of the equipment.

Keywords: reliability; probability distribution; harvester; maintenance; sugar cane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Função de Densidade de Weibull com vários valores de γ	26
Figura 2 – Curva da banheira e o ciclo de vida dos equipamentos	27
Figura 3 – Diagrama de blocos para um conjunto de componentes em série ...	28
Figura 4 – Diagrama de blocos para um conjunto de componentes em paralelo	29
Figura 5 – Esquema do fluxo de corte e fracionamento de cana-de-açúcar realizado por uma colhedora do tipo chopper	30
Figura 6 – Ilustração do corte e fracionamento de cana por colhedoras	30
Figura 7 – Metodologia do trabalho	31
Figura 8 – Detalhamento de ordens de parada de colhedoras	32
Figura 9 – Sistemas de colhedoras de cana-de-açúcar	34
Figura 10 – Sistema e subsistema de colhedoras a partir do serviço	35
Figura 11 – Dias disponíveis para safra 23'24	37
Figura 12 – Dias acumulados para safra 23'24	38
Figura 13 – Taxa Variável para projeção de 5 horas	41
Figura 14 – Taxa Acumulada para projeção de 5 horas	41
Figura 15 – Taxa Variável para projeção de 10 horas	41
Figura 16 – Taxa Acumulada para projeção de 10 horas	42
Figura 17 – Taxa Variável para projeção de 25 horas	42
Figura 18 – Taxa Acumulada para projeção de 25 horas	42
Figura 19 – Taxa Variável para projeção de 50 horas	43
Figura 20 – Taxa Acumulada para projeção de 50 horas	43
Figura 21 – Painel de Confiabilidade RBD da Colhedora 91534	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sistemas e subsistemas de colhedoras de cana-de-açúcar	34
Tabela 2 – MTBF (h) variável por sistemas das colhedoras analisadas	40
Tabela 3 – MTBF (h) acumulado por sistemas das colhedoras analisadas	41
Tabela 4 – MTBF variável por sistemas das colhedoras analisadas	45
Tabela 5 – MTBF acumulado por sistemas das colhedoras analisadas	45
Tabela 6 – MTBF (dias) de sistemas da colhedora 91534 durante a safra	46
Tabela 7 – Dados de confiabilidade da colhedora 91534 com projeção de 1 dia	46

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>MTBF</i>	Tempo médio entre falhas
<i>HP</i>	Regime de trabalho de operação do equipamento
<i>HMC</i>	Horas de manutenção corretiva
<i>MTTR</i>	Tempo médio para reparos
<i>RBD</i>	<i>Reliability Block Diagram</i> (Diagrama de Blocos de Confiabilidade)
<i>DF</i>	Disponibilidade física do equipamento
<i>HMT</i>	Horas total de manutenção

LISTA DE SÍMBOLOS

$R(t)$	Confiabilidade a qualquer tempo t
λ	Taxa de falhas
e	Base dos logaritmos neperianos
t	Tempo até a falha
$Projeção(h)$	Projeção do tempo em horas (missão)
$F(t)$	Função de distribuição de probabilidade acumulada
λ_e	Parâmetro de escala da função exponencial
$f(t)$	Função densidade de probabilidade
$h(t)$	Função taxa de falhas
$R(t)$	Função de confiabilidade
α	Parâmetro de forma da distribuição Gamma
μ	Parâmetro de escala da distribuição Lognormal
σ	Parâmetro de forma da distribuição Lognormal
γ	Parâmetro de forma da distribuição Weibull
θ	Parâmetro de escala da distribuição Weibull
$R(t)$	Componente x do sistema de referência de estabilidade
$R_1(t)$	Confiabilidade do componente 1 do sistema
$R_2(t)$	Confiabilidade do componente 2 do sistema
$R_n(t)$	Confiabilidade dos n componentes do sistema

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO GERAL	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3	JUSTIFICATIVA	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	MANUTENÇÃO	18
2.1.1	Típos de manutenção	18
2.1.1.1	Manutenção Corretiva	19
2.1.1.2	Manutenção Preventiva	19
2.1.1.3	Manutenção Preditiva	20
2.2	INDICADORES DE MANUTENÇÃO	20
2.2.1	Tempo médio entre falhas	21
2.2.2	Tempo médio entre reparos	21
2.2.3	Disponibilidade Física	22
2.3	CONFIABILIDADE	22
2.3.1	Engenharia da Confiabilidade	23
2.3.2	Distribuições de Probabilidade	24
2.3.2.1	Distribuição Exponencial	24
2.3.2.2	Distribuição Gama	25
2.3.2.3	Distribuição Lognormal	25
2.3.2.4	Distribuição Weibull	26
2.3.3	Taxa de Falhas	28
2.3.4	Diagrama de Bloco de Confiabilidade	30
2.4	COLHEDORAS DE CANA-DE-AÇÚCAR	31
2.5	MICROSOFT EXCEL	33
3	METODOLOGIA	33
3.1	ORIGEM E COLETA DOS DADOS	33
3.2	TRATAMENTO DOS DADOS	34
3.3	ANÁLISE DOS DADOS	38
3.3.1	Confiabilidade Geral – Taxa Variável e Taxa Acumulada	38

3.3.2	Confiabilidade de Sistemas de Colhedoras	39
4	RESULTADOS	40
4.1	CONFIABILIDADE GERAL – TAXA VARIÁVEL E TAXA ACUMULADA	40
4.2	CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE COLHEDORAS	46
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Em 1975, de acordo com a CONAB (2018), visando reduzir os efeitos da crise mundial do petróleo, o governo brasileiro implantou o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que abriu portas para a produção de cana-de-açúcar, a fim de substituir a gasolina por etanol. Nesse sentido, conforme a CONAB (2021), com os avanços tecnológicos sobre a produção da cana-de-açúcar, o Brasil, em 2020, se tornou o maior produtor de cana nos últimos tempos, com 654,5 toneladas na safra 20/21. Ademais, a principal causa deste resultado, segundo Costa Neto (2006), foi a mecanização da colheita, visto que uma colhedora substitui aproximadamente a 100 cortadores, podendo chegar a um rendimento de 15 a 20 toneladas por dia.

Sendo assim, com base em NOVO (2019), a busca incessante pelo aumento na produção de cana e por retorno financeiro, geram novas necessidades para a indústria, fazendo com que as máquinas colhedoras de cana-de-açúcar se tornem cada vez mais tomadas de recursos de controle e automação. Simultaneamente, surge a necessidade de redução na probabilidade de falhas destes equipamentos, falhas estas que aumentam os custos de produção.

Dessa forma, o investimento em confiabilidade tem se destacado em empresas que buscam estratégias além da ótica tradicional. Em concordância com VERSSANI (2018), obter dados de confiabilidade dos sistemas de colhedoras de cana-de-açúcar, está entre um dos principais motivos para melhorar a eficiência e reduzir os custos, parâmetros estes um dos mais importantes para aumentar a rentabilidade e assegurar as funcionalidades das empresas sucroalcooleiras (NOVO, 2019).

Portanto, este trabalho visa analisar o fenômeno de falha de máquinas colhedoras de cana-de-açúcar, por meio de um estudo comparativo entre distribuições de tempos de vida. Para averiguar a confiabilidade de colhedoras, os dados foram modelados com a função exponencial. Para os sistemas, a análise se deu com a representação em diagrama de blocos (RBD), relacionando os sistemas com os termos de confiabilidade. O Microsoft Excel foi utilizado para realização de todos os cálculos de confiabilidade e demais estimativas gráficas.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral a realização de um estudo acerca da confiabilidade aplicada à manutenção de máquinas de uma empresa agrícola, a fim de oferecer uma análise mais precisa e detalhada do fenômeno de falha de sistemas de colhedoras de cana-de-açúcar.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtenção de direcionamentos para construção de planos de ações eficientes;
- Diagnóstico prévio de possíveis causas de indisponibilidade do equipamento.
- Analisar detalhadamente a influência de falhas sobre a disponibilidade do equipamento;
- Garantir valores de confiabilidade de cada sistema mecânico.

1.3 JUSTIFICATIVA

A cada safra, empresas agrícolas enfrentam o desafio de manter uma sequência constante e estável na produção de cana-de-açúcar. Com a realização de manutenção corretiva em colhedoras, conforme Nascimento (2020), o maquinário acaba sendo incapacitado de ter uma boa produtividade, além de gerar um aumento nos custos de manutenção.

Sendo assim, as empresas estão cada vez mais procurando abordagens para melhorar suas estratégias de manutenção. Entre estas, está o estudo da confiabilidade aplicada à manutenção, já que é fundamental para prevenir falhas, prolongar a vida útil e reduzir o tempo ocioso de equipamentos.

Nesse sentido, buscando a redução dos impasses supracitados, o trabalho atual propõe um detalhamento da confiabilidade por sistemas mecânicos de colhedoras de cana-de-açúcar, a fim de prever alguns fenômenos de falha destes equipamentos e, assim, direcionar planos de ações corretamente e ser mais assertivo na manutenção de sistemas específicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MANUTENÇÃO

Segundo Kardec e Nascif (2005), a manutenção consiste no conjunto de atividades indispensáveis para assegurar que os equipamentos e instalações estejam disponíveis, atendendo às necessidades do processo produtivo e preservando o meio ambiente, com confiabilidade, segurança e custos adequados para a empresa.

No que diz respeito a evolução da manutenção, foi no século XVI, consoante Viana (2002), que com a introdução dos primeiros teares mecânicos e o declínio do sistema econômico feudal, a manutenção se tornou uma função essencial na produção. Nessa época, os fabricantes de máquinas eram responsáveis por treinar os funcionários para operar e manter os equipamentos, considerados, portanto, de mantenedores, não havendo uma equipe de manutenção dedicada.

Conforme Helmann (2006), à medida que ocorreram avanços, a manutenção passou a ser considerada um parâmetro crucial para os custos gerados na produção, pois as interrupções não planejadas das máquinas e equipamentos na linha de produção resultam em queda de receita, o que pode levar a grandes prejuízos para a empresa.

A seguir serão discutidos os principais tipos de manutenção.

2.1.1 Tipos de manutenção

Antes de nos envolvermos nos métodos de manutenção, discutiremos alguns termos específicos, como: Defeito, Falha e Pane.

Por um lado, de acordo com a norma da ABNT (NBR 5462), o defeito é qualquer discrepância apresentada na característica de um item em relação aos requisitos exigidos. Por outro lado, ainda segundo a ABNT (NBR 5462), a falha pode ser vista como a perda da capacidade de um item em desempenhar a função para a qual foi designado. Em complemento, caracterizamos a pane, que se trata de um estado emergente decorrente de uma falha.

Estes conceitos são de suma importância na classificação dos métodos apresentados a seguir, já que, conforme Kardec e Nascif (2005), dependendo da

maneira pela qual são executadas as intervenções de manutenção nas máquinas e equipamentos, estas são classificadas por diferentes tipos e com características próprias e distintas.

De acordo com Xenos (1998) e Lafraia (2001), existem três categorias de métodos de manutenção, que são a manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

2.1.1.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é o único tipo de manutenção que é executado após a ocorrência de uma falha. De acordo com Viana (2002), o objetivo da manutenção corretiva é restabelecer a função necessária do equipamento, eliminando o estado de pane. Ele ainda acrescenta que a manutenção corretiva é uma intervenção imediata necessária para evitar graves consequências aos equipamentos de produção, à segurança dos trabalhadores ou ao meio ambiente.

De acordo com Nunes (2001), a manutenção corretiva pode ser dividida em duas categorias: planejada e emergencial. A planejada envolve intervenções temporárias que visam restabelecer o funcionamento do equipamento, com a intenção de realizar o reparo definitivo posteriormente. Enquanto isso, a emergencial envolve intervenções definitivas que restauram permanentemente o equipamento.

A partir das considerações de Xenos (1998), é possível inferir que a manutenção corretiva é uma opção mais fácil implementação do que a manutenção preventiva. No entanto, as paradas não programadas podem gerar grandes prejuízos e interromper a produção, o que pode ser bastante custoso para a empresa.

2.1.1.2 Manutenção Preventiva

Em concordância com Nunes (2001), a manutenção preventiva é um tipo de intervenção de manutenção que tem como objetivo reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas em um equipamento. Ela é realizada antes da data prevista para o aparecimento da falha e é planejada e preparada antecipadamente.

Realizar a manutenção preventiva de forma periódica é uma atividade essencial e obrigatória em qualquer empresa. Viana (2002), reforça que, apesar

do custo mais elevado desse tipo de manutenção, devido à necessidade de troca de peças e reforma de componentes antes de atingirem o fim de sua vida útil, a frequência de ocorrência de falhas é significativamente reduzida. Isso resulta em uma diminuição das interrupções extraordinárias na produção e um aumento na disponibilidade dos equipamentos. Sendo assim, a manutenção preventiva planejada oferece diversas vantagens para empresas fabris em comparação com a manutenção corretiva.

2.1.1.3 Manutenção Preditiva

Assim como a manutenção preventiva, a manutenção preditiva tem como objetivo evitar a ocorrência de falhas em equipamentos. De acordo com Bechtold (2010), a manutenção preditiva é responsável por prever a possibilidade de uma falha em um equipamento, sendo realizada por meio de monitoramento e observações frequentes ou constantes das condições do equipamento.

Ademais, conforme Kardec e Nascif (2013), a manutenção preditiva refere-se à utilização de técnicas de análises e monitoramentos dos sistemas mecânicos e componentes da máquina, frequentemente fazendo uso de tecnologia, a fim de evitar falhas. De forma direta, a manutenção preditiva possibilita a utilização mais eficiente do equipamento, levando a condições de uso que se aproximam da vida útil.

A manutenção preditiva tem como objetivo determinar com precisão o momento necessário para intervenção, evitando desperdícios e utilizando o componente até o fim de sua vida útil. Viana (2002) diz que, para realizar o monitoramento, são comumente utilizadas medições, como análise de ruídos, análise de vibrações, análise de ultrassom, análise de temperaturas e análise cromatográfica de óleos lubrificantes. Em equipamentos tecnológicos, é possível utilizar o controle de medições dinâmico, incluindo medições online.

2.2 INDICADORES DE MANUTENÇÃO

A avaliação do desempenho, Segundo Viana (2021), é crucial para as empresas e, assim como em outras funções de fabricação, a medição de performance é fundamental no gerenciamento da manutenção. Os indicadores

de manutenção são frequentemente usados para medir o êxito na eficiência de um equipamento ou processo de manutenção. Ainda em conformidade com Viana (2021), os indicadores de manutenção mais utilizados nas empresas são: o Tempo Médio entre Falhas (MTBF), Tempo Médio entre Reparos (MTTR) e a Disponibilidade Física (DF).

A seguir, discutiremos sobre cada indicador que será utilizado neste trabalho.

2.2.1 Tempo Médio Entre Falhas

De acordo com De Melo (2018), o MTBF (*Mean Time Between Failures*), em português, Tempo Médio Entre Falhas, tem uma grande importância, pois está diretamente relacionado com a disponibilidade das máquinas que estão em funcionamento. Conforme Viana (2021), o MTBF é definido como a razão da soma das horas disponíveis do equipamento (considerando apenas tempos corretivos), pelo somatório de eventos corretivos neste equipamento no período. A equação 1 abaixo demonstra o cálculo do MTBF.

$$MTBF = \frac{(HP - HMC)}{\sum \text{Eventos Corretivos}} \quad (1)$$

Onde, *HMC* são as horas de manutenção corretiva e *HP* representa as horas programadas para produção, ou seja, o regime de trabalho de operação do equipamento.

Ademais, ainda segundo De Melo (2018), o MTBF é muito valorizado pelo departamento de manutenção, pois o MTBF é uma medida de confiabilidade do ativo físico. Uma vez que, há um aumento no índice do MTBF, sugere-se uma melhoria na manutenção e uma redução no número de falhas corretivas.

2.2.2 Tempo Médio para Reparos

Conforme Kardec e Nascif (2009), o MTTR (*Mean Time to Repair*) em português, Tempo Médio para Reparos, refere-se ao tempo médio necessário para realizar reparos, sendo que esse indicador considera apenas a manutenção

corretiva. De acordo com a definição, o MTTR é calculado pela divisão entre a soma do tempo em que a operação ficou indisponível devido às horas de manutenção corretiva (HMC) e o número total de intervenções corretivas durante o período. A equação 2 descreve o MTTR.

$$MTTR = \frac{HMC}{\sum \text{Eventos Corretivos}} \quad (2)$$

Com base em Viana (2021), quanto mais baixo for o valor do MTTR, melhor será a situação na área, indicando que os reparos corretivos estão se tornando cada vez menos prejudiciais para a produção.

2.2.3 Disponibilidade Física

Segundo a definição de Viana (2021), a Disponibilidade Física (DF) é o percentual das horas em que um equipamento está disponível para operação em relação ao total de horas programadas no período, levando em conta os períodos em que o equipamento ficou indisponível para manutenção preventiva e corretiva. A equação 3 abaixo define a DF.

$$DF = \frac{(HP - HMT)}{HP} \times 100\% \quad (3)$$

Na equação 3, temos que: *HMT* é o total de horas de manutenção (soma de horas de manutenção corretiva e preventiva).

Ademais, segundo De Melo (2018), o valor calculado por esta equação indica a disponibilidade de um equipamento para operação em relação ao tempo total durante um determinado período, expresso em termos percentuais. De Melo (2018) ainda diz que, essa medida é de grande relevância para a estratégia de operação dos departamentos de manutenção, visando atender às necessidades do processo produtivo.

2.3 CONFIABILIDADE

Conforme Machado *et al.* (2022), na década de 1950, houve a

necessidade de investigar e corrigir falhas frequentes em equipamentos eletrônicos amplamente utilizados na área militar. Para sanar essa necessidade, foram desenvolvidos estudos matemáticos que se aplicavam aos componentes de um sistema, visando garantir a manutenção e a qualidade de suas ferramentas. Foi nessa época que a Confiabilidade emergiu.

De acordo com a norma NBR-5462 (ABNT, 1994), a confiabilidade pode ser vista como a capacidade de um determinado item, componente, dispositivo, máquina ou sistema desempenhar sua função sem falhar, conforme as condições operacionais especificadas, dentro do intervalo de tempo especificado.

A falha, segundo o padrão IEEE 1633 de 2016, é o fim da capacidade de um item, sistema, componente ou produto de realizar uma função necessária dentro dos limites especificados. Quando a perda de um serviço esperado é encontrada, dizemos que houve uma falha. Após o evento de falha, o estado operacional do item passa a ser um estado falho.

Segundo Novo (2019), o modo de falha é a forma pela qual uma falha pode ocorrer. Além disso, o tempo de falha é a unidade de tempo transcorrido, normalmente medido em minutos, horas, dias, meses ou anos, desde o momento em que o item é colocado em operação até a sua primeira falha.

Conforme Kardec e Nascif (2009, p.124) “Nós falamos de confiabilidade, mas medimos falhas”.

2.3.1 Engenharia da Confiabilidade

No início dos anos 60, com a Guerra Fria, os Estados Unidos tiveram interesses na corrida armamentista, com isso, surge, em 1963, época em que muitos estudos relacionados à confiabilidade foram publicados, a primeira associação reunida por engenheiros de confiabilidade (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009).

Dessa época para os tempos atuais, a engenharia da confiabilidade se vê presente para diminuir muitos fatores que possui influência no risco existente no desenvolvimento de um produto (E SILVA, 2019).

A confiabilidade de um item poderá ser obtida a partir de uma modelagem de seus tempos entre falhas, e a partir disso obter-se o modelo de distribuição

que melhor se adequa a esses tempos. Dentre as distribuições probabilísticas, existem cinco mais comumente utilizadas: Exponencial, Gama, Lognormal e Weibull (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009).

2.3.2 Distribuições de Probabilidade

A fim de descrever o comportamento aleatório de um fenômeno dependente do acaso, utilizamos as distribuições de probabilidade. Segundo Fogliato e Ribeiro (2009), algumas distribuições são utilizadas para modelar componentes, equipamentos ou ferramentas, com o objetivo de adquirir informações, como o tempo de falha do item, bem como sua confiabilidade. Há distribuições, que pela sua alta capacidade de análise de sobrevivência, retratam apropriadamente muitos casos reais, são elas: Exponencial, Lognormal, Gama e Weibull (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

2.3.2.1 Distribuição Exponencial

Segundo Vaccaro (1997), a distribuição mais comum é a distribuição Exponencial, pois sua aplicação é mais voltada para componentes ou sistemas que apresentam uma função de risco (taxa de falha) contínua, ou melhor, uma probabilidade de falhar a qualquer momento, independe de ser novo ou não. Nesse sentido, conforme Fogliatto e Ribeiro (2009), para a distribuição Exponencial, temos em confiabilidade as seguintes expressões:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda_e t} \quad (4)$$

$$f(t) = \lambda_e e^{-\lambda_e t} \quad (5)$$

$$h(t) = \lambda_e \quad (6)$$

$$R(t) = e^{-\lambda_e t} \quad (7)$$

Em que, λ_e e t se dizem respeito ao parâmetro da função exponencial e ao tempo até a falha, respectivamente. A equação 4 mostra a função de

distribuição de probabilidade acumulada $F(t)$, a equação 5 apresenta a função de densidade de probabilidade $f(t)$, a equação 6 indica a função de risco $h(t)$ e a equação 7 a função de confiabilidade $R(t)$.

2.3.2.2 Distribuição Gama

Além da distribuição Exponencial, temos a distribuição Gama, que com base em Vaccaro (1997), é uma generalização da função exponencial. Ademais, o autor ainda ressalta que, para modelagens de Confiabilidade, a distribuição Gama é muito utilizada e tem entre suas principais aplicações à análise de tempo de vida de produtos. Entretanto, dependendo dos valores considerados por seus parâmetros, a modelagem da função Gama pode sofrer alterações rapidamente, tornando-a uma distribuição inapropriada para alguns produtos.

Segundo Flogliatto e Ribeiro (2009), para a distribuição Gama, temos as seguintes equações:

$$F(t) = \frac{1}{\lambda^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^t t^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) dx = 1 - \left[\frac{\Gamma\left(\alpha, \frac{t}{\lambda}\right)}{\Gamma(\alpha)} \right] \quad (8)$$

$$f(t) = \frac{1}{\lambda^\alpha \Gamma(\alpha)} t^{\alpha-1} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) \quad (9)$$

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

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (11)$$

Onde, temos a alteração em termos, em relação a função exponencial, apenas nos parâmetros de forma (α) e escala (λ).

2.3.2.3 Distribuição Lognormal

A distribuição Lognormal, por sua vez, é uma distribuição amplamente

utilizada por possuir uma capacidade de modelagem mesmo que as anomalias e falhas do equipamento crescem ao longo do tempo (E SILVA, 2019). Essa distribuição, é muito utilizada para modelar tempo de produtos e materiais, incluindo fadiga de metais, semicondutores, diodos e isolamento elétrica.

Segundo a abordagem de Flogiatto e Ribeiro (2009), as equações 12, 13, 14 e 15 definem a distribuição Lognormal.

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\ln x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln y - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dy \quad (12)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (13)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (14)$$

$$R(t) = \Phi\left(\frac{\mu - \ln(t)}{\sigma}\right) = \int_{\ln(t)}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2\right) dx \quad (15)$$

Onde, μ é o parâmetro de escala e σ é o parâmetro de forma da distribuição Lognormal.

2.3.2.4 Distribuição Weibull

Por fim, a distribuição mais utilizada em modelagem de confiabilidade e a que consegue representar melhor uma grande variedade de amostras de tempos até a falha, conforme Flogiatto e Ribeiro (2009), é a distribuição de Weibull.

Ademais, sobre Weibull podemos afirmar que:

O método Weibull é utilizado para se analisar os riscos de falha, a partir do histórico operacional de uma dada amostra de equipamento, usando a distribuição estatística criada por Wallodi Weibull. A análise fornece a probabilidade de falha ao longo do tempo para aquela amostra e identifica em que parte da curva da banheira, os equipamentos estão operando. (Zaghetto *et al.*, 2007, p.3).

Flogliatto e Ribeiro (2009) descrevem a confiabilidade de Weibull com os parâmetros $t \geq 0$, $\gamma \geq 0$ e $\theta \geq 0$, a partir das seguintes formulações:

$$F(t) = 1 - e^{-(\frac{t}{\theta})^\gamma} \quad (16)$$

$$f(t) = \left(\frac{\gamma}{\theta}\right) \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-(\frac{t}{\theta})^\gamma} \quad (17)$$

$$h(t) = \left(\frac{\gamma}{\theta}\right) \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} \quad (18)$$

$$R(t) = e^{-(\frac{t}{\theta})^\gamma} \quad (19)$$

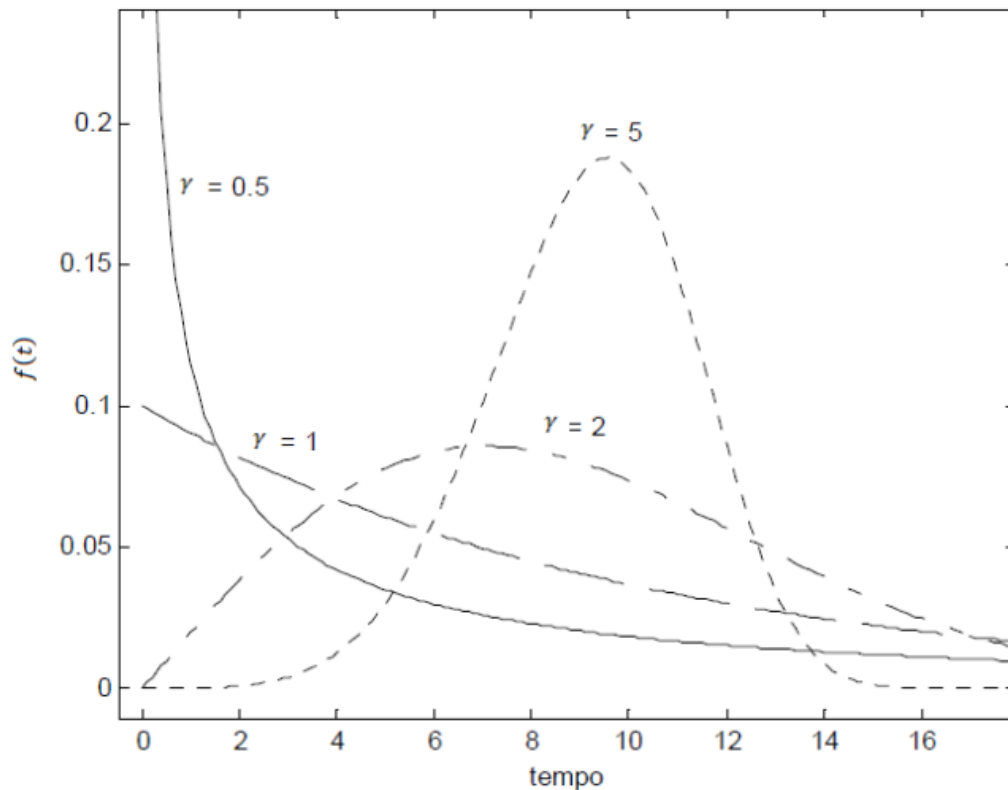
Onde, os estimadores da função de Weibull γ e θ representam a forma e a escala, respectivamente.

Por um lado, o fator de forma γ , em conformidade com E Silva (2019), proporciona categorizar as falhas de uma amostra e diz respeito como irá se comportar a curva (Figura 1). Por outro lado, o fator θ aponta sobre qual será a escala da curva e o valor em que uma certa porcentagem da amostra terá falhado (ZAGHETTO *et al.*, 2007).

Para um parâmetro de forma menor do que 1 ($\gamma < 1$) temos falhas prematuras; igual a 1 ($\gamma = 1$) temos uma taxa de falha constante (falhas aleatórias); e maior do que 1 ($\gamma > 1$) temos que a taxa de falha é dependente do tempo (falhas acontecem por desgaste do material).

Conforme Dodson (2006), existem alguns métodos para estimativa dos parâmetros de Weibull (γ e θ), entre eles estão: Método Gráfico de Risco (*Hazard Plotting*), Método Gráfico de Probabilidade (*Probability Plotting*), Método de Máxima Verossimilhança, Método dos Momentos e *Median Rank*. Neste trabalho não abordaremos nenhum destes estimadores.

Figura 1 – Função de Densidade de Weibull com vários valores de γ .



Fonte: Adaptado de Zaghetto *et al.* (2007).

2.3.3 Taxa de Falhas

Segundo a NBR 5462 (1994), a falha pode ser definida como “o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”. Portanto, a falha leva o item a um estado de não disponibilidade. Quanto maior for a quantidade de falhas de um item, menor é a sua confiabilidade (XENOS, 1998; KARDEC e NASCIF, 2009).

Representado pela letra λ , Kardec e Nascif (2009) definem a taxa de falhas conforme a seguinte equação:

$$\lambda = \frac{\text{Número de falhas}}{\text{Número de horas por operação}} \quad (20)$$

Podendo ser escrito também em função do MTBF da seguinte forma:

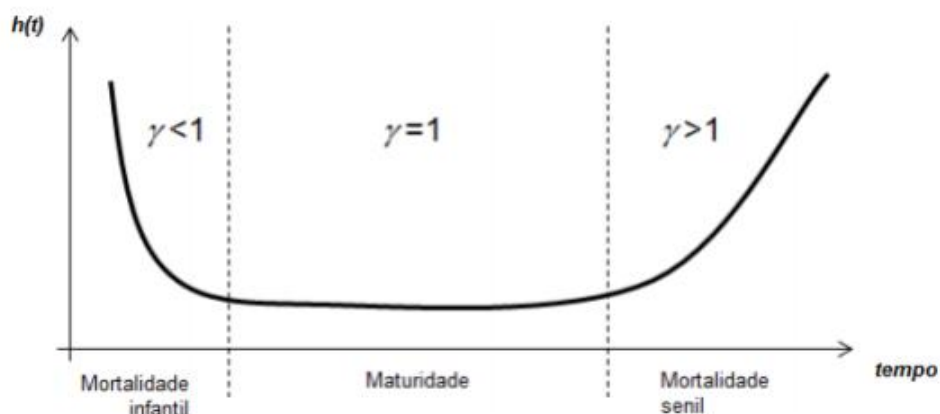
$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (21)$$

Xenos (1998), diz que as falhas podem ocorrer de três formas distintas, são elas: crescente, decrescente ou constante.

- Crescente: descreve itens que se desgastam ou degradam com o tempo, por exemplo, incluem componentes mecânicos e eletrodomésticos.
- Decrescente: adequada para caracterizar situações em que o risco decresce ou ao menos não cresce com o tempo. É usada, normalmente, para modelar a confiabilidade de softwares, em que a incidência de defeitos diminui à medida que o produto passa por revisões.
- Constante: falhas dadas por eventos aleatórios, ou seja, quando a força aplicada supera a resistência do item. Dizemos que, a probabilidade de isso acontecer não muda com o envelhecimento do item.

Além disso, a combinação das três formas de falhas dá origem a um modelo conhecido como “curva da banheira” (Figura 2), devido ao fato do seu formato. Conforme Kardec e Nascif (2009), a maioria dos produtos manufaturados, como por exemplo, componentes elétricos, mecânicos e sistemas, seguem costuma apresentar uma função de risco combinada (curva da banheira).

Figura 2 – Curva da banheira e o ciclo de vida dos equipamentos.



Fonte: Machado (2022).

Sellitto (2005), define, para cada fase da curva, uma técnica de

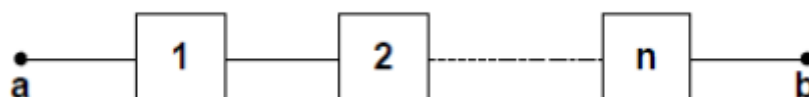
manutenção que se amolde a condição do equipamento, essas são: para a primeira fase (mortalidade infantil), o ideal é a utilização da manutenção corretiva, já que a taxa de falhas é alta, mas acontece de forma decrescente; na segunda fase (maturidade), o ideal é que se utilize a manutenção preditiva, pois a taxa de falhas é menor que na fase inicial, ficando próximo a uma média constante; e no último período, o ideal é a manutenção preventiva, com o intuito de trocar peças ou equipamentos antes que os mesmos falhem.

2.3.4 Diagrama de Bloco de Confiabilidade

De acordo com Kuo (2003), o Diagrama de Bloco de Confiabilidade, originado do inglês *Reability Block Diagram* (RBD), é um método diagramático que visa apresentar como a confiabilidade dos componentes colabora para o sucesso ou ruína de um sistema.

Segundo Fazolli (1998), os blocos funcionam independentemente, sem falhas, e a confiabilidade do sistema pode ser determinada com base na forma da estrutura e no valor da confiabilidade de cada bloco. Na RBD, os componentes do sistema são representados por blocos, que geralmente estão conectados em série e/ou paralelo.

Figura 3 – Diagrama de blocos para um conjunto de componentes em série.



Fonte: Azevedo, V. R. *et al.* (2012).

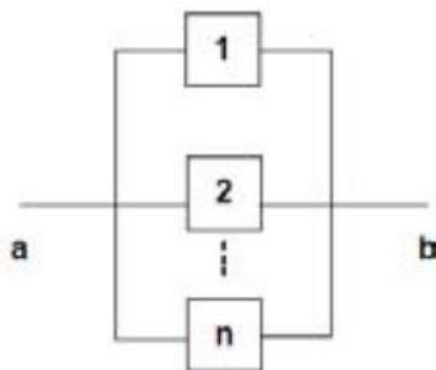
A confiabilidade de um sistema em série é dada pela Equação 22:

$$R(t) = R_1(t) * R_2(t) * ... R_n(t) \quad (22)$$

Onde $R(t)$ é a confiabilidade do sistema, $R_1(t)$ é a confiabilidade do componente 1 do sistema, $R_2(t)$ é a confiabilidade do componente 2 do sistema e $R_n(t)$ representa a confiabilidade de cada um dos n componentes.

Para diagramas em paralelo, temos a seguinte representação:

Figura 4 – Diagrama de blocos para um conjunto de componentes em paralelo.



Fonte: Azevedo, V. R. *et al.* (2012).

Conforme Azevedo, V. R. *et al.* (2012), o diagrama em paralelo é utilizado quando apenas um dos componentes é necessário para que o sistema funcione, ou seja, o sistema falha apenas se todos os componentes falharem.

Neste trabalho, a configuração em série foi utilizada para modelagem do RBD das colhedoras analisadas.

2.4 COLHEDORAS DE CANA-DE-AÇUCAR

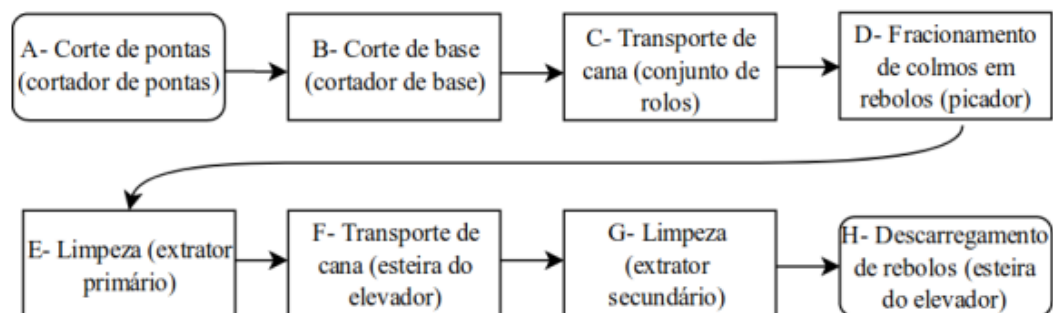
A colheita de cana-de-açúcar, conforme Ripoli e Paranhos (1897), pode ser definida em 3 principais sistemas: manual, sistema semi-mecanizado e colheita mecanizada. Ripoli e Ripoli (2015) diz que, a colheita mecanizada é realizada por um equipamento denominado de colhedora, que possui funções de cortar próximo ao solo, fracionar, limpar e carregar a matéria-prima em unidades de transporte.

De acordo com a Norma Regulamentadora número 12 (NR-12) de 2017, as colhedoras de cana permitem que a colheita seja feita de modo uniforme, já que esses equipamentos possuem um sistema de corte, denominado corte de base, que é capaz de cortar a cana-de-açúcar acompanhando o perfil do solo.

Conforme Novo (2019), as colhedoras de cana-de-açúcar são classificadas em dois tipos: *whole stalk* (colmo inteiro) e *chopper* (picador).

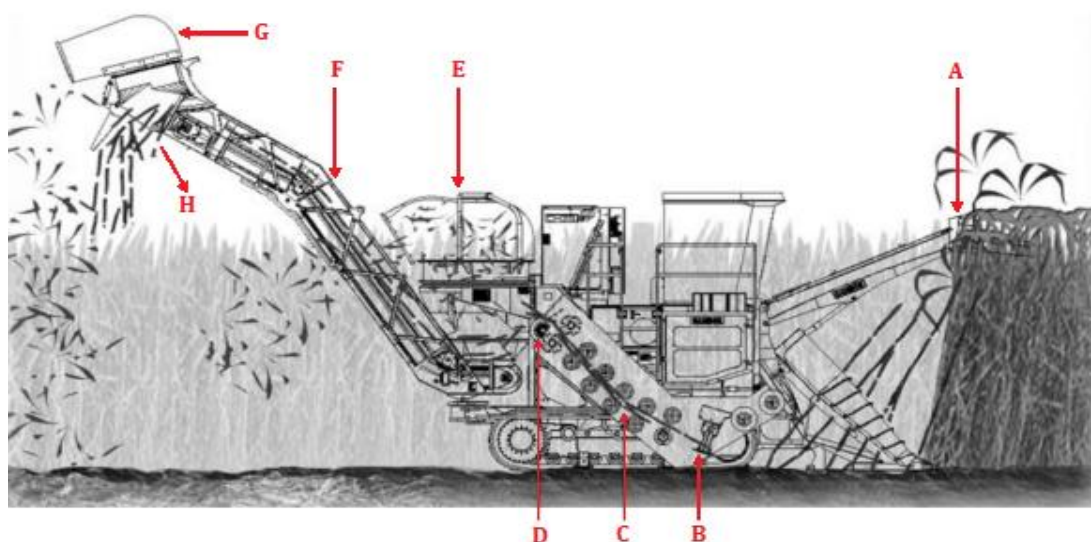
Na Figura 5 abaixo, temos um esquema de como funciona o fluxo de corte e fracionamento da cana-de-açúcar por meio das colhedoras do tipo *chopper*. Ademais, na Figura 6, há a ilustração da execução das etapas desse esquema.

Figura 5 – Esquema do fluxo de corte e fracionamento de cana-de-açúcar realizado por uma colhedora do tipo *chopper*.



Fonte: Novo (2019).

Figura 6 – Ilustração do corte e fracionamento de cana por colhedoras.



Fonte: Adaptado de Deere & Company (2009).

Por um lado, colhedoras da classe *whole stalk* consistem em entregar a cana inteira para um veículo de transporte ou para o campo. Por outro, as colhedoras do tipo *chopper* possuem rolos picadores, que funcionam cortando os colmos da cana em partes menores (15 a 40 centímetros de comprimento em média), e possuem extratores, que eliminam parcialmente a matéria vegetal e mineral. Neste trabalho foram analisadas 50 colhedoras da classe *chopper* para a análise de confiabilidade.

2.5 MICROSOFT EXCEL

Oliveira (2017) aborda que, o *software* Microsoft Excel é um programa de planilhas eletrônicas bastante utilizado em engenharia devido às suas características de ampla disponibilidade, isto é, por ser pertencente ao pacote Microsoft Office; possuir grande quantidade de funções matemáticas e estatísticas; ser fácil para importação de dados (arquivos de dados, instrumentos de laboratórios e placa de aquisição de dados); e por possuir diversas ferramentas de análise de dados.

Para este trabalho, o Microsoft Excel foi utilizado para a realização de todos os cálculos de confiabilidade e demais estimativas gráficas.

3 METODOLOGIA

Após a discussão acerca do estudo, a metodologia do trabalho seguirá a seguinte ordem: origem e coleta dos dados, tratamento dos dados, análise dos dados e discussão dos resultados (Figura 7).

Figura 7 – Metodologia do trabalho.



Fonte: Autoria Própria (2024).

A seguir, nas seções 3.1, 3.2 e 3.3 serão discutidos cada passo da metodologia supracitada.

3.1 ORIGEM E COLETA DOS DADOS

Para o atual estudo, os dados de campo de sistemas de colhedoras foram retirados a partir de uma visita em uma empresa agrícola que possui 50 colhedoras.

Inicialmente, todos os dados foram coletados a partir do sistema “Novo Manfro Manutenção”, da desenvolvedora TOTVS. Dele são extraídas as ordens de serviço, as quais foram exportadas para o Excel (Figura 8).

Figura 8 – Detalhamento de ordens de parada de colhedoras.

Número O.S	Classe de Manutenção	Cód. Equipamento	Grupo Operativo	Data Entrada	Data Saída	Descrição do Serviço
5011145	Corretiva	173224	Colhedora	30/06/2022 20:39	01/07/2022 04:02	BEN-MO-583 - Afrouxou as aletas da canela do corte de base**(Finalizada por CS317901)**
5011155	Corretiva	173213	Colhedora	01/07/2022 07:52	01/07/2022 10:54	BEN-MO-582 - Estourou pulia do carrinho do elevador**(Finalizada por CS364396)**
5011214	Corretiva	173208	Colhedora	01/07/2022 10:58	01/07/2022 12:23	BEN-MO-581 - Soltou chapa defletora está pegando no prato do corte de base**(Finalizada por CS356896)**
5011346	Corretiva	173226	Colhedora	01/07/2022 16:28	01/07/2022 22:34	BEN-MO-582 - Parou o ar condicionado.**(Finalizada por CS364396)**
5011366	Corretiva	173224	Colhedora	02/07/2022 09:30	02/07/2022 14:25	BEN-MO-583 - Estourou mangueira de alimentação do bloco do elevador**(Finalizada por CS364396)**
5011527	Corretiva	173224	Colhedora	04/07/2022 10:17	04/07/2022 12:30	BEN-MO-583 - Quebrou pistão do giro **(Finalizada por CS356896)**

Fonte: Autoria Própria (2024).

3.2 TRATAMENTO DOS DADOS

Após coletado os dados, um tratamento na base foi necessário para que houvesse uma separação das falhas por sistemas e subsistemas mecânicos, conforme a ordem de serviço. Nesse sentido, para isso acontecer, inicialmente foi necessário uma análise mais completa de quais são os sistemas mecânicos de colhedoras.

O balanço supracitado é apresentado na Figura 9, onde foram divididos 13 sistemas e a partir deles, foram descritos seus subsistemas, como apresenta a Tabela 1.

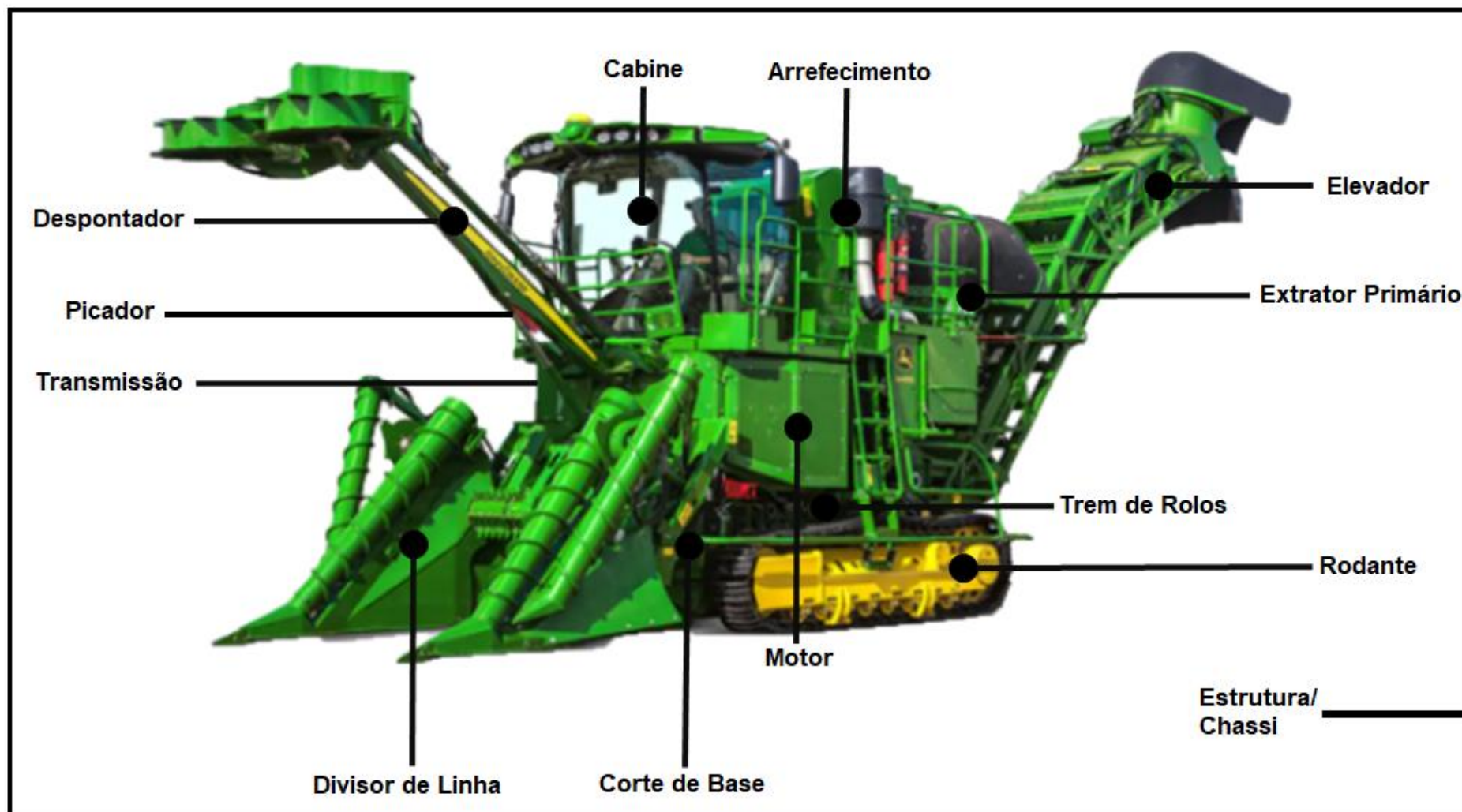
Com a separação dos sistemas e subsistemas, considerando que os itens falhos dos sistemas de colhedoras sejam substituíveis, o MTBF foi definido como parâmetro a ser calculado, e assim, este foi realizado a partir da razão entre as horas trabalhados do equipamento e a quantidade de ordens de serviço corretivas.

Tabela 1 – Sistemas e subsistemas de colhedoras de cana-de-açúcar.

Sistema	Subsistemas
Arrefecimento	Circuito de água, Radiador, Subsistema elétrico e Subsistema hidráulico
Cabine	Ar-condicionado, Banco, Estrutura, Iluminação, Painel, RTK e Subsistema elétrico
Despontador	Estrutura, Subsistema elétrico e Subsistema hidráulico
Picador	Caixa de engrenagens, Estrutura, Mancais e acoplamentos, Rolos e facas, Volante, acoplamento e engrenagem, Subsistema elétrico e Subsistema hidráulico
Transmissão	Caixa de bombas, Caixa de engrenagens, Redução final, Subsistema elétrico e Subsistema hidráulico
Divisor de Linha	Acumulador hidráulico, Bandejas, Estrutura, IHU, Mancais e acoplamentos, Pirulito, Ponteira, Sapata, Subsistema elétrico e Subsistema hidráulico
Corte de Base	Caixa de engrenagens, Canela, Disco, Estrutura, Subsistema elétrico e Subsistema hidráulico
Motor	Admissão, Alimentação, Bloco e cabeçote, EGR, Subsistema de escape, Subsistema de lubrificação, Subsistema elétrico e Turbocompressor
Estrutura/Chassis	Estrutura, IHU, Mancal e pás, Supressão de incêndio, suspensão dianteira, tanque diesel e tanque hidráulico
Rodante	Roda guia, Aro motriz, Esteira rodante, Mola tensora, Rolete e Eixo truck
Trem de Rolos	Berço, Estrutura, Mancais e acoplamentos, Rolo, Rolo tombador, Rolos, Subsistema elétrico e Subsistema hidráulico
Extrator Primário	Estrutura, Mancal e pás, Subsistema elétrico e Subsistema hidráulico
Elevador	Esteira transportadora, Mecanismo de giro, Subsistema hidráulico, Subsistema elétrico, Estrutura, Extrator secundário, Talisca, Engrenagens, Assoalhos e trilhos e Engrenagem

Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 9 – Sistemas de colhedoras de cana-de-açúcar.



Fonte: Adaptado de Deere & Company (2009).

A partir da conexão do bordo das colhedoras com o sistema da TOTVS “Novo Manfro Manutenção”, conseguimos extrair a base de horas trabalhadas das colhedoras durante o período solicitado. Assim, a equação 1 do MTBF descrito na seção 2.2.1 pode ser reajustada para da seguinte forma:

$$MTBF = \frac{\text{Horas trabalhadas do equipamento}}{\text{Quantidade de ordens corretivas}} \quad (23)$$

Para realizar o cálculo do MTBF por sistemas, a partir da coluna “Descrição do Serviço”, da Figura 10, foi realizada uma filtragem dos dados conforme os sistemas e assim, contabilizou-se as ordens de serviço corretivas dos sistemas e a razão com as horas trabalhadas de cada equipamento ocorreu novamente. Tal filtragem pode ser ilustrada pela Figura 10 abaixo.

Figura 10 – Sistema e subsistema de colhedoras a partir do serviço.

Descrição do Serviço	Sistema	Subsistema
BEN-MO-581 - Consertar ar condicionado	Cabine	Ar condicionado
BEN-MO-581 - Vazamento pistão suspensão L.D. e regular esteira rodante, Trocar pistão giro do elevador	Rodante	Esteira Rodante
BEN-MO-583 - Problema na esteira	Elevador	Esteira transportadora
BEN-MO-582 - Escorrendo óleo em cima do corte de base	Corte de base	Subsistema hidráulico
BEN-MO-581 - Troca de facão	Picador	Rolos e facas
BEN-MO-582 - Descarrilou a esteira do elevador	Elevador	Esteira transportadora
BEN-MO-583 - Travou a esteira do elevador	Elevador	Esteira transportadora
BEN-MO-582 - Trocando Motor do corte de base	Corte de base	Subsistema hidráulico
BEN-MO-582 - Vazamento na suspensão	Estrutura/Chassi	Suspensão dianteira
BEN-MO-582 - Parou de funcionar o ar condicionado.	Cabine	Ar condicionado
BEN-MO-582 - Perca de potência	Motor	Alimentação
BEN-MO-581 - vazamento das mangueiras do pistão da suspensão	Estrutura/Chassi	Suspensão dianteira

Fonte: Autoria Própria (2024).

Para este trabalho, escolheu-se a função exponencial como a distribuição de probabilidade a ser seguida, pois sua aplicação é mais voltada para componentes ou sistemas que apresentam uma probabilidade de falhar a qualquer momento, independe de ser novo ou não. Nesse sentido, conforme

Flogliatto e Ribeiro (2009), a função de confiabilidade exponencial pode ser definida como:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (24)$$

Em que, λ e t se dizem respeito a taxa de falhas e ao tempo até a falha (missão projetada), respectivamente.

Como vimos na seção 2.3.3, a função taxa de falhas pode ser definida em função do MTBF (Equação 21). Sendo assim, representando a Equação 24 em termos do MTBF, temos a seguinte expressão:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{1}{MTBF}\right)t} \quad (25)$$

Utilizando a equação supracitada calculou-se a confiabilidade com taxa variável (mês a mês), a confiabilidade com taxa acumulada, e por fim, a confiabilidade em blocos.

3.3 ANÁLISE DOS DADOS

3.3.1 Confiabilidade Geral - Taxa Variável e Taxa Acumulada

A etapa de análise dos dados se inicia com a definição de qual distribuição de probabilidade seguir partindo dos dados de falha. Como já foi dito, a função exponencial será utilizada neste trabalho. Com a definição da função, seguimos para o cálculo da confiabilidade que se inicia com a definição do MTBF. Para isso, levantou-se o total de ordens corretivas e de horas trabalhadas por cada equipamento durante cada mês. A taxa variável é aquela que me traz um resultado de confiabilidade apenas naquele mês específico, já a taxa acumulada me traz um acúmulo de MTBF desde o início da contagem, neste caso, desde o início da safra (quando o equipamento começou trabalhar).

Ambas as taxas foram calculadas a partir da aplicação da equação 25 e seus resultados são descritas graficamente na seção 4.1.

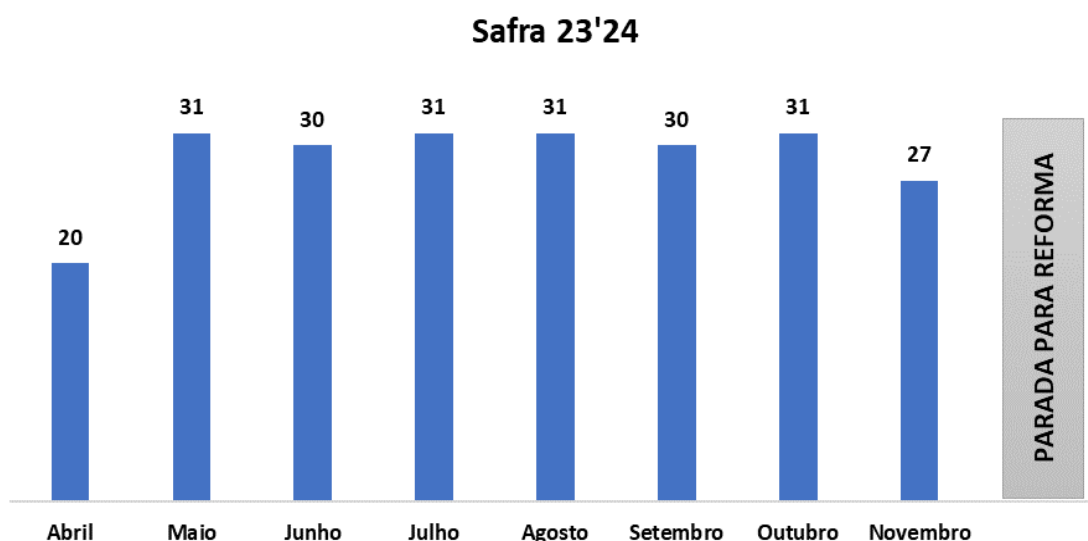
3.3.2 Confiabilidade de Sistemas de Colhedoras

Para estimar a confiabilidade de sistemas de uma colhedora, tratamos dos diagramas de blocos de confiabilidade, conforme descrito na seção 2.3.4 deste trabalho. Essa confiabilidade é calculada a partir do MTBF acumulado de cada sistema. Com os valores de $R(t)$ de cada componente, o RBD da colhedora foi calculado em Excel e um painel para melhor ilustrar tais valores foi montado.

Visando calcular a confiabilidade, tanto em taxa variável, quanto em taxa acumulada, foi necessário informações do software “Manfro Lubrificação e Abastecimento” da desenvolvedora TOTVS. O software em discussão traz informações de horas de motor das colhedoras, informação importante para levantar o MTBF de cada equipamento.

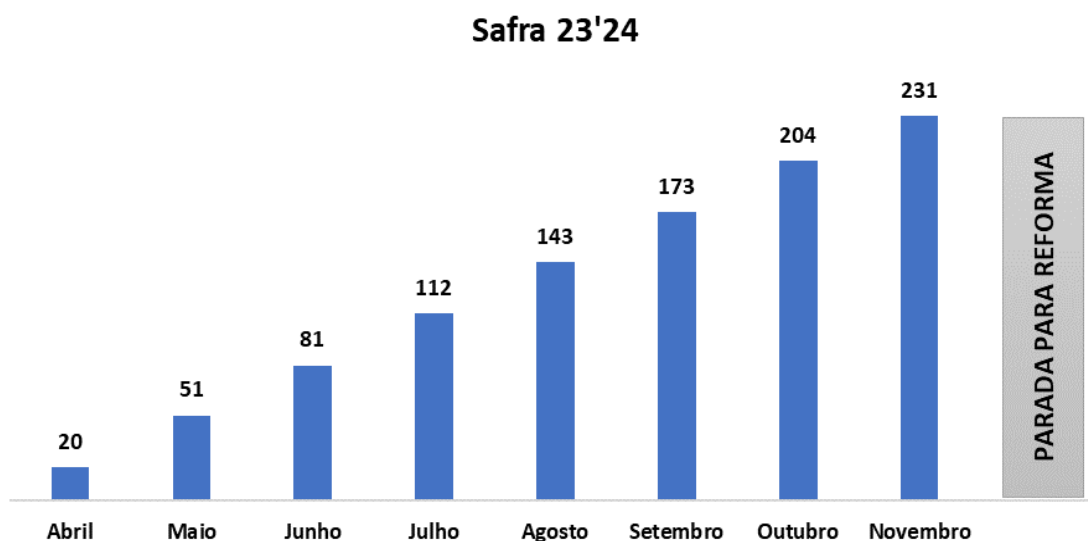
Ademais, uma outra estimativa foi levantada de MTBF, essa agora se tratando de dias. Para esta, na taxa variável é considerado a quantidade de dias de cada mês (desde o início da safra), já para a confiabilidade acumulada, um somatório de dias por mês foi realizado, totalizando 231 dias de safra, conforme as Figuras 11 e 12, a seguir.

Figura 11 – Dias disponíveis para safra 23'24.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 12 – Dias acumulados para safra 23'24.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Para este trabalho, o MTBF foi calculado das duas formas, o de horas e o de dias. A primeira opção foi utilizada para estimativa dos gráficos de confiabilidade de taxa variável e acumulada, por fornecer mais credibilidade por se tratar das horas reais de motor de cada equipamento. Já a segunda opção foi calculada e utilizada para estimar o MTBF por sistemas de colhedoras.

4 RESULTADOS

4.1 CONFIABILIDADE GERAL - TAXA VARIÁVEL E TAXA ACUMULADA

Inicialmente, para estimativa confiabilidade em taxa variável e acumulada, o MTBF, em horas, variável e acumulado por sistemas das 50 colhedoras fora calculado e é exposto pelas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 - MTBF (h) variável por sistemas das colhedoras analisadas.

MTBF (Variável)																	
Equipamento	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	Equipamento	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV
Colhedora 1	0,0	36,0	35,1	26,7	33,0	25,6	12,5	31,7	Colhedora 26	157,9	36,8	61,9	233,0	44,4	35,9	35,4	30,8
Colhedora 2	89,7	50,3	63,4	111,4	33,1	31,6	39,5	27,4	Colhedora 27	151,4	40,4	39,2	25,2	19,7	39,3	59,9	21,2
Colhedora 3	25,1	20,4	69,9	76,5	34,3	40,5	18,0	27,2	Colhedora 28	79,2	36,6	235,3	35,6	25,9	27,0	39,2	158,2
Colhedora 4	37,9	21,4	54,1	41,7	27,4	16,1	19,8	48,8	Colhedora 29	114,1	62,6	215,2	43,1	20,4	33,8	31,3	36,3
Colhedora 5	24,4	34,9	51,4	72,2	81,1	30,8	21,6	56,9	Colhedora 30	86,1	83,7	92,9	56,6	56,9	32,2	40,8	39,3
Colhedora 6	16,6	36,0	44,6	39,4	51,5	36,8	36,7	29,3	Colhedora 31	84,6	38,3	18,8	31,1	16,9	25,0	20,5	16,8
Colhedora 7	74,7	90,8	392,6	93,3	97,4	133,7	74,1	90,8	Colhedora 32	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	31,1	14,4	19,5
Colhedora 8	195,8	61,4	96,5	62,1	71,3	408,9	40,6	39,3	Colhedora 33	46,6	34,8	77,4	28,7	15,6	30,7	33,2	28,5
Colhedora 9	62,0	122,8	50,6	115,0	52,1	29,4	41,9	94,5	Colhedora 34	49,6	49,6	30,8	34,8	14,3	26,5	24,5	19,0
Colhedora 10	220,1	38,5	71,6	47,6	63,4	56,8	35,7	57,4	Colhedora 35	32,2	21,8	25,6	26,9	13,4	15,4	27,8	34,7
Colhedora 11	34,7	72,0	110,2	116,4	112,1	117,1	24,4	25,8	Colhedora 36	0,0	0,0	0,0	0,0	12,8	19,8	31,4	17,7
Colhedora 12	41,8	41,9	66,8	59,3	52,0	40,1	28,3	40,8	Colhedora 37	120,5	222,3	186,8	157,2	157,1	128,8	171,6	71,0
Colhedora 13	61,6	25,2	14,3	18,2	19,4	24,8	0,0	0,0	Colhedora 38	53,8	55,4	59,8	32,4	23,5	51,4	56,8	36,1
Colhedora 14	0,0	0,0	0,0	0,0	38,4	32,7	33,3	48,1	Colhedora 39	137,6	41,5	96,1	56,3	31,3	82,4	20,3	42,7
Colhedora 15	23,9	38,9	33,5	62,5	30,2	27,9	49,0	63,5	Colhedora 40	54,7	232,4	408,2	123,8	26,0	23,6	86,6	59,9
Colhedora 16	22,9	142,7	113,4	252,6	30,9	60,8	57,8	66,2	Colhedora 41	175,1	158,9	97,5	73,2	98,8	41,5	45,0	54,4
Colhedora 17	0,0	29,8	40,2	86,3	14,9	37,8	29,4	25,3	Colhedora 42	162,1	158,3	198,3	239,5	162,2	46,9	28,9	85,3
Colhedora 18	120,7	102,8	125,4	130,4	96,6	61,4	91,0	43,6	Colhedora 43	89,5	205,2	48,7	28,4	33,7	65,6	95,3	28,8
Colhedora 19	65,6	58,6	45,2	44,0	42,9	39,1	30,3	58,1	Colhedora 44	111,7	66,9	24,4	42,1	14,8	22,7	18,0	30,8
Colhedora 20	42,7	84,5	32,0	72,7	37,3	38,4	64,3	38,6	Colhedora 45	44,3	76,5	34,8	38,8	20,4	41,0	21,7	31,8
Colhedora 21	203,2	64,3	72,1	72,3	36,2	113,5	74,4	52,5	Colhedora 46	37,2	36,3	30,1	45,2	10,6	12,1	20,0	13,5
Colhedora 22	52,1	52,1	67,5	99,1	45,1	239,0	117,0	183,1	Colhedora 47	0,0	32,7	0,0	6,0	18,5	14,2	43,5	37,6
Colhedora 23	47,6	50,3	45,9	57,7	32,8	48,5	50,3	50,5	Colhedora 48	63,2	27,2	21,8	25,7	13,3	20,6	34,1	0,0
Colhedora 24	0,0	102,2	54,4	26,6	26,3	22,7	21,6	73,4	Colhedora 49	138,1	23,3	44,9	67,1	30,5	19,5	42,8	22,3
Colhedora 25	142,7	80,9	48,5	159,9	86,3	74,8	67,6	47,3	Colhedora 50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,1	33,4	30,0

Fonte: Autoria Própria (2024).

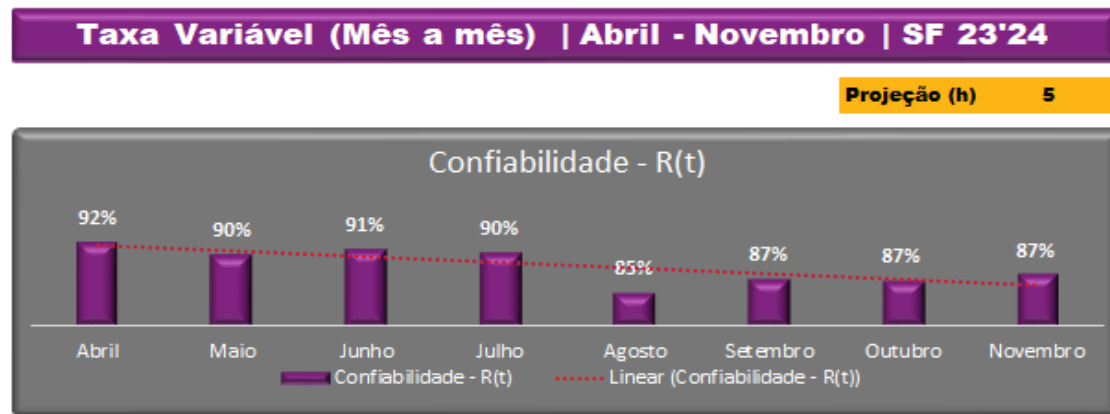
Tabela 3 – MTBF (h) acumulado por sistemas das colhedoras analisadas.

MTBF (Acumulado)																	
Equipamento	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	Equipamento	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV
Colhedora 1	0,0	36,0	35,3	30,5	31,2	29,8	25,1	25,9	Colhedora 26	157,9	46,9	51,9	70,0	60,9	53,9	50,4	47,1
Colhedora 2	89,7	58,2	59,7	68,8	57,4	48,6	47,2	43,6	Colhedora 27	151,4	55,5	48,3	41,2	35,6	36,4	39,2	35,5
Colhedora 3	25,1	21,7	29,1	36,7	36,1	36,9	33,7	32,8	Colhedora 28	79,2	44,5	61,8	48,2	38,7	35,8	36,2	40,2
Colhedora 4	37,9	25,0	30,2	32,8	31,5	27,2	26,0	27,6	Colhedora 29	114,1	81,6	100,7	66,8	41,7	39,8	38,6	38,3
Colhedora 5	24,4	30,7	35,4	41,4	46,9	42,8	37,8	39,2	Colhedora 30	86,1	105,2	99,9	76,8	69,9	57,7	54,8	52,9
Colhedora 6	16,6	26,3	30,7	32,9	36,1	36,2	36,3	35,3	Colhedora 31	84,6	44,9	30,6	30,7	25,7	25,5	24,8	23,3
Colhedora 7	74,7	86,2	142,3	124,4	116,0	118,8	109,5	106,8	Colhedora 32	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	28,1	22,5	21,9
Colhedora 8	195,8	78,2	84,3	76,1	75,0	87,8	76,7	68,9	Colhedora 33	46,6	37,5	46,9	38,7	29,4	29,6	30,1	29,9
Colhedora 9	62,0	92,4	74,5	83,5	73,8	59,0	56,4	59,5	Colhedora 34	49,6	49,6	40,2	38,2	26,8	26,8	26,5	25,5
Colhedora 10	220,1	51,5	56,8	53,6	55,5	55,8	52,0	52,6	Colhedora 35	32,2	23,5	24,3	25,0	20,8	19,7	20,4	21,2
Colhedora 11	34,7	53,4	66,5	78,2	84,7	88,7	67,3	56,3	Colhedora 36	0,0	0,0	0,0	0,0	9,4	13,5	16,6	16,8
Colhedora 12	41,8	41,9	48,4	51,4	51,5	49,0	44,9	44,3	Colhedora 37	120,5	188,4	187,7	176,3	171,0	162,0	163,2	141,3
Colhedora 13	61,6	30,7	24,2	22,0	21,3	21,6	21,6	21,6	Colhedora 38	53,8	55,0	56,7	45,7	37,2	39,2	40,9	40,2
Colhedora 14	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	24,9	27,9	31,8	Colhedora 39	137,6	50,3	62,5	60,3	50,4	54,4	45,1	44,8
Colhedora 15	23,9	32,2	32,6	36,8	34,6	33,3	35,0	37,2	Colhedora 40	54,7	125,8	172,9	153,3	73,1	55,5	58,2	58,4
Colhedora 16	22,9	55,6	68,0	91,0	71,0	68,7	66,9	66,8	Colhedora 41	175,1	217,2	148,8	111,0	107,8	84,9	76,3	73,3
Colhedora 17	0,0	29,8	33,9	43,2	30,4	31,6	31,3	30,4	Colhedora 42	162,1	212,4	206,7	216,1	199,9	131,9	88,7	88,3
Colhedora 18	120,7	108,7	114,3	119,2	112,9	98,5	97,5	85,8	Colhedora 43	89,5	166,7	84,1	50,7	44,9	46,9	50,1	45,9
Colhedora 19	65,6	60,7	54,4	50,3	48,2	46,2	43,3	44,6	Colhedora 44	111,7	73,3	42,4	42,3	30,4	29,2	27,6	27,9
Colhedora 20	42,7	61,7	47,6	52,4	48,2	45,9	48,0	46,8	Colhedora 45	44,3	64,5	53,0	46,8	34,6	35,7	33,6	33,4
Colhedora 21	203,2	81,7	78,0	76,0	60,3	66,0	67,0	65,0	Colhedora 46	37,2	36,6	34,1	36,6	30,1	25,9	25,1	22,1
Colhedora 22	52,1	52,1	56,4	65,7	59,0	69,0	64,4	78,1	Colhedora 47	0,0	32,7	32,7	11,4	16,3	15,4	19,7	22,8
Colhedora 23	47,6	49,5	48,2	50,9	45,1	45,7	45,6	46,8	Colhedora 48	63,2	33,2	28,0	27,3	22,3	22,0	23,1	23,1
Colhedora 24	0,0	102,2	61,2	37,6	33,0	30,2	28,5	31,1	Colhedora 49	138,1	32,0	36,3	43,2	39,7	33,5	34,6	32,8
Colhedora 25	142,7	109,4	73,9	91,1	89,9	86,9	83,7	76,8	Colhedora 50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,1	22,8	25,2

Fonte: Autoria Própria (2024).

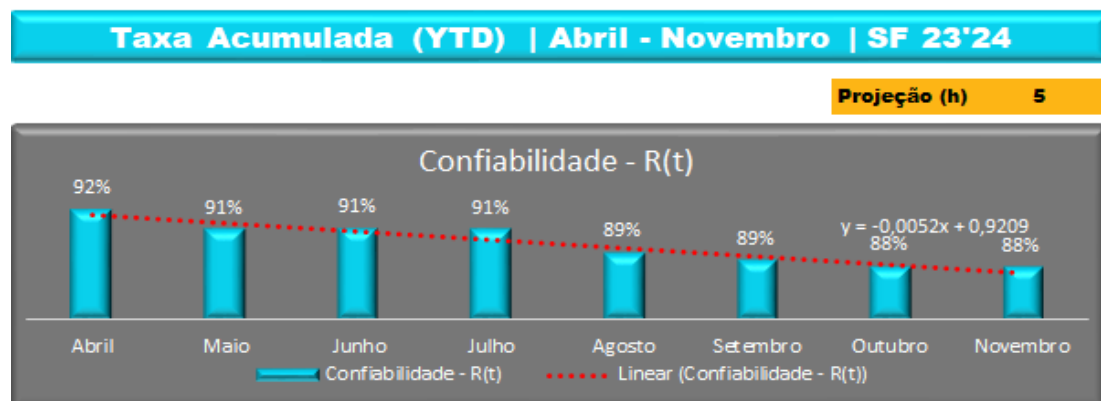
Com os dados de MTBF, seguimos para as estimativas de confiabilidade. Para a estimativa, fixou-se uma estimativa de tempo em horas (projeção h) em 5, 10, 25 e 50. Os gráficos abaixo são as taxas de confiabilidade descritas.

Figura 13 - Taxa Variável para projeção de 5 horas.



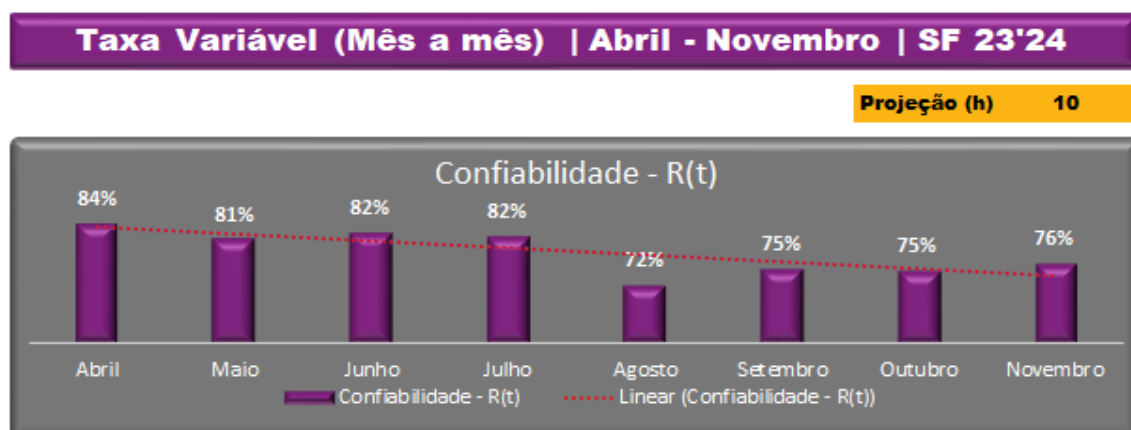
Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 14 - Taxa Acumulada para projeção de 5 horas.



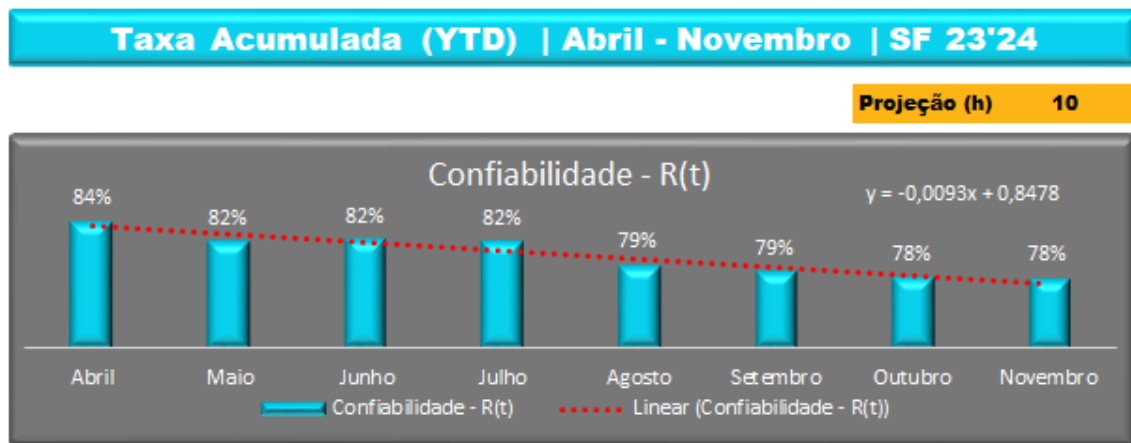
Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 15 - Taxa Variável para projeção de 10 horas.



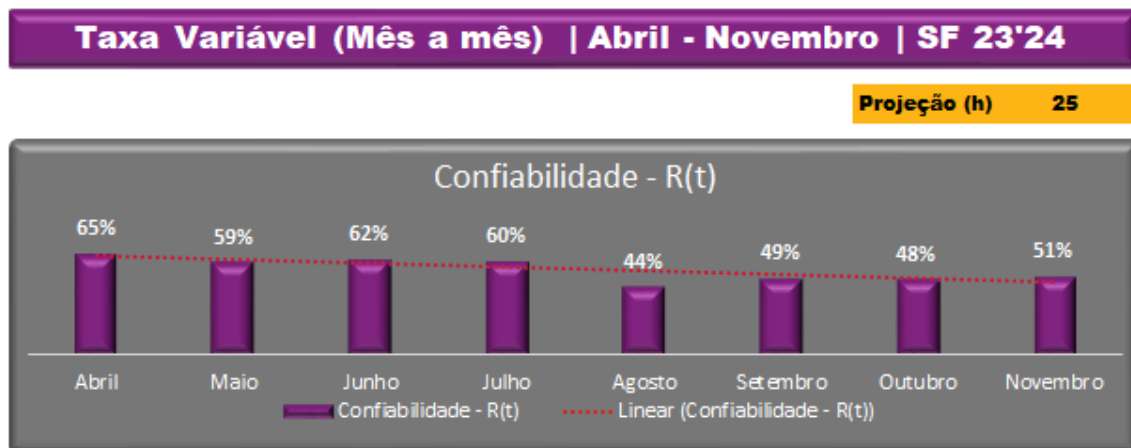
Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 16 - Taxa Acumulada para projeção de 10 horas.



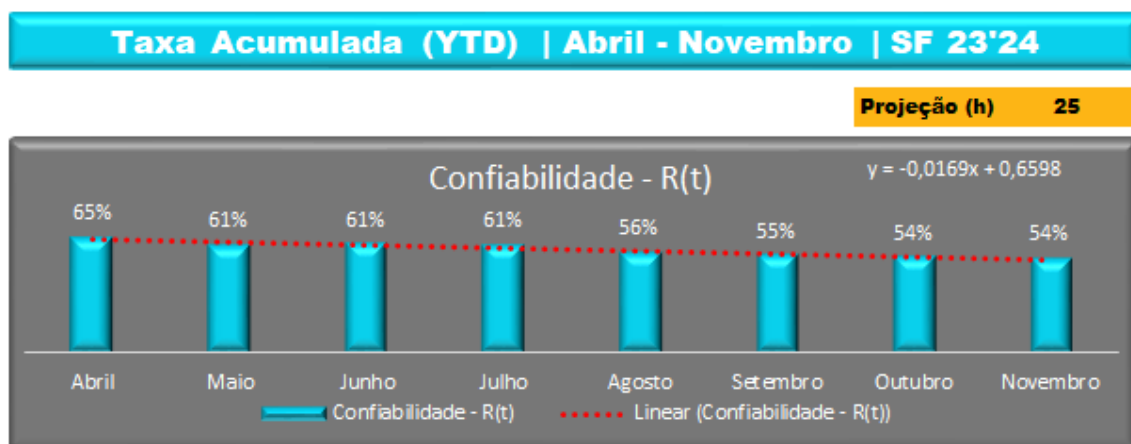
Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 17 - Taxa Variável para projeção de 25 horas.



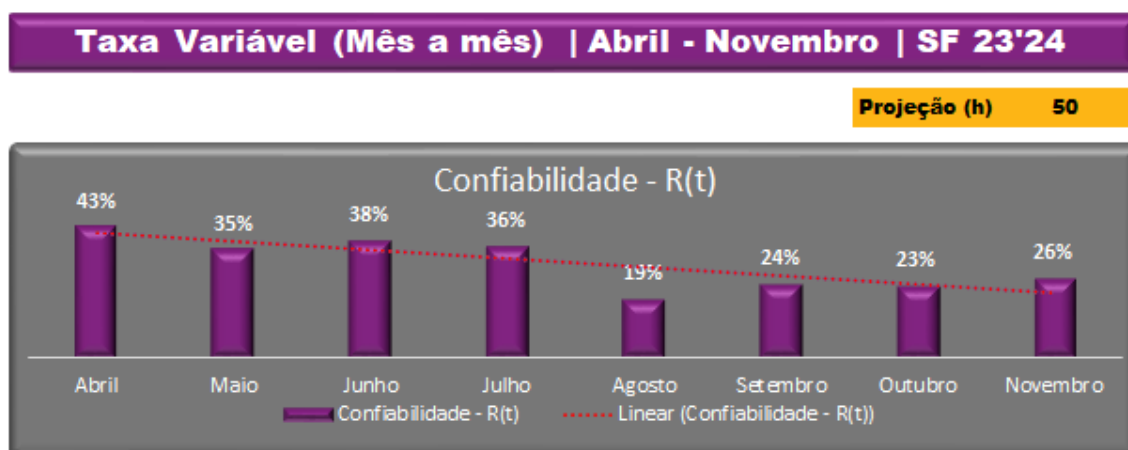
Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 18 - Taxa Acumulada para projeção de 25 horas.



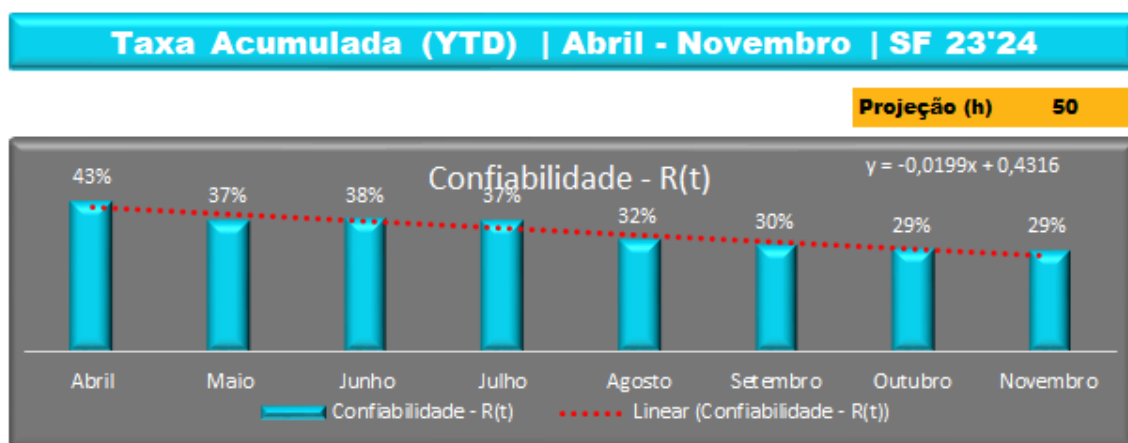
Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 19 - Taxa Variável para projeção de 50 horas.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 20 - Taxa Acumulada para projeção de 50 horas.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Percebe-se a cada pulso de tempo, a cada aumento da projeção de horas, a confiabilidade diminui mês a mês. As Figuras 13 e 14 nos trazem um entendimento que, para uma projeção de tempo de 5 horas de funcionamento direto das colhedoras, ou seja, sem parada, eu tenho uma confiabilidade de 92% no mês de abril. O mesmo entendimento tiramos dos demais gráficos, porém como a projeção de tempo está aumentando, a confiabilidade está diminuindo.

Esse comportamento é notável e reflete a realidade, pois vemos que a confiabilidade é maior no início da safra, onde as máquinas estão reformadas, ou seja, ocorre uma troca de peças que estavam desgastadas durante a safra por peças novas, sendo assim a confiabilidade é maior nos meses de abril a julho. Já nos demais meses, de agosto a novembro, vemos uma queda de

confiabilidade, devido ao uso excessivo do equipamento causando um desgaste de componentes. São nestes períodos que temos uma maior de parte de falhas de motores de colhedoras.

4.2 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE COLHEDORAS

Posteriormente, o MTBF, em dias, variável e acumulado por sistemas das 50 colhedoras fora calculado e é exposto pelas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 – MTBF variável por sistemas das colhedoras analisadas.

MTBF (Variável)								
Dias de Safra por Mês	20	31	30	31	31	30	31	27
Sistemas / Mês	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV
Arrefecimento	6,67	2,82	3,33	2,21	1,94	1,76	1,35	1,50
Cabine	1,67	1,15	1,67	1,24	0,74	0,59	0,82	0,87
Corte de base	2,50	1,35	1,88	2,38	1,19	1,76	2,07	1,29
Despontador	20,00	7,75	15,00	31,00	7,75	6,00	31,00	5,40
Divisor de linha	4,00	1,00	1,30	0,94	0,63	0,58	0,55	0,63
Elevador	1,33	0,60	0,67	0,43	0,27	0,43	0,39	0,46
Estrutura/Chassi	1,25	0,86	1,25	0,57	0,46	0,43	0,67	0,55
Extrator primário	3,33	3,44	2,50	2,21	1,94	2,31	1,63	2,08
Motor	1,18	0,44	0,68	0,53	0,29	0,42	0,82	0,50
Picador	2,22	0,70	1,03	0,97	0,62	0,77	0,84	0,69
Rodante	5,00	4,43	5,00	10,33	6,20	1,88	5,17	2,70
Transmissão	2,22	2,21	2,73	2,82	0,97	2,50	1,94	1,80
Trem de rolos	2,86	1,07	1,25	0,69	0,49	0,60	0,84	0,84

Fonte: Autoria Própria (2024).

Tabela 5 – MTBF acumulado por sistemas das colhedoras analisadas.

MTBF (Acumulado)								
Dias de Safra por Mês	20	51	81	112	143	173	204	231
Sistemas / Mês	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV
Arrefecimento	6,67	3,64	3,52	3,03	2,70	2,47	2,19	2,08
Cabine	1,67	1,31	1,42	1,37	1,15	0,99	0,96	0,95
Corte de base	2,50	1,65	1,72	1,87	1,66	1,68	1,73	1,66
Despontador	20,00	10,20	11,57	16,00	13,00	10,81	12,00	10,50
Divisor de linha	4,00	1,42	1,37	1,22	1,01	0,90	0,82	0,79
Elevador	1,33	0,76	0,72	0,61	0,48	0,47	0,46	0,46
Estrutura/Chassi	1,25	0,98	1,07	0,86	0,72	0,65	0,65	0,64
Extrator primário	3,33	3,40	3,00	2,73	2,51	2,47	2,29	2,26
Motor	1,18	0,58	0,61	0,59	0,48	0,47	0,50	0,50
Picador	2,22	0,96	0,99	0,98	0,87	0,85	0,85	0,83
Rodante	5,00	4,64	4,76	5,60	5,72	4,22	4,34	4,05
Transmissão	2,22	2,22	2,38	2,49	1,86	1,94	1,94	1,93
Trem de rolos	2,86	1,42	1,35	1,07	0,85	0,79	0,80	0,80

Fonte: Autoria Própria (2024).

Como temos muitos dados na base, para demonstrar os resultados, um estudo de caso foi proposto com a colhedora de código “91534”. A análise percorrerá em toda a safra 23’24, a fim de discorrer a confiabilidade dos sistemas da colhedora escolhida a partir da aplicação da definição de RBD.

Para iniciar, calculamos primeiro o MTBF da colhedora 91534, a qual é exposto na tabela abaixo.

Tabela 6 – MTBF (dias) de sistemas da colhedora 91534 durante a safra.

Sistema	OS Corretivas	MTBF
Arrefecimento	7	33,00
Cabine	4	57,75
Corte de base	7	33,00
Despontador	2	115,50
Divisor de linha	8	28,88
Elevador	11	21,00
Estrutura/Chassi	9	25,67
Extrator primário	3	77,00
Motor	7	33,00
Picador	10	23,10
Rodante	3	77,00
Transmissão	2	115,50
Trem de rolos	11	21,00

Fonte: Autoria Própria (2024).

Com o MTBF calculado, projetamos a missão (tempo) para 1 dia, ou seja, calcularemos a confiabilidade para o funcionamento da colhedora em 1 dia direto sem parada. Aplicando essas variáveis na equação 25 temos os seguintes resultados descritos na tabela abaixo.

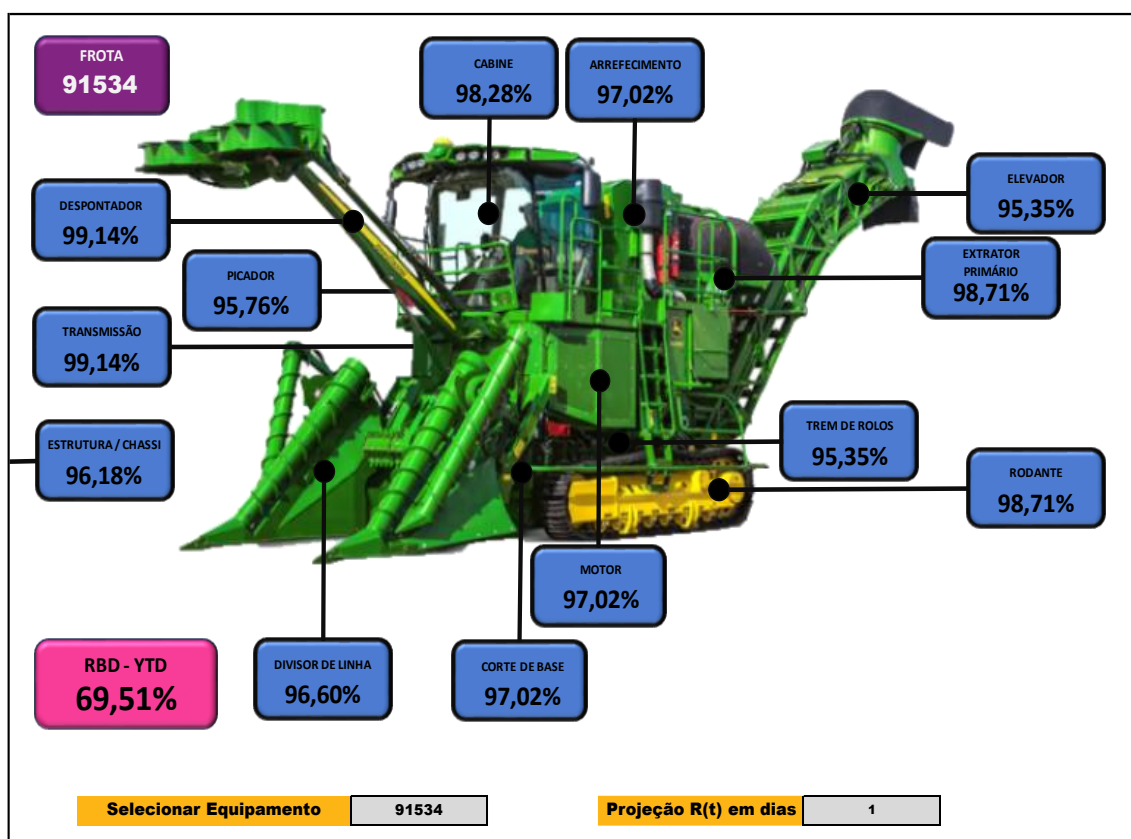
Tabela 7 – Dados de confiabilidade da colhedora 91534 com projeção de 1 dia.

Sistema	Taxa de falha	R(t)
Arrefecimento	0,0303030	97,02%
Cabine	0,0173160	98,28%
Corte de base	0,0303030	97,02%
Despontador	0,0086580	99,14%
Divisor de linha	0,0346320	96,60%
Elevador	0,0476190	95,35%
Estrutura/Chassi	0,0389610	96,18%
Extrator primário	0,0129870	98,71%
Motor	0,0303030	97,02%
Picador	0,0432900	95,76%
Rodante	0,0129870	98,71%
Transmissão	0,0086580	99,14%
Trem de rolos	0,0476190	95,35%

Fonte: Autoria Própria (2024).

Com os valores de $R(t)$ de cada bloco, temos o gráfico abaixo com o RBD.

Figura 21 – Painel de Confiabilidade RBD da Colhedora 91534.



Fonte: Autoria Própria (2024).

O RBD foi calculado multiplicando todos os blocos de confiabilidade, ou seja, com a multiplicação da confiabilidade de cada sistema conseguimos a confiabilidade RBD da colhedora.

Como ponto positivo de destaque, temos os sistemas Despontador e Transmissão, ambos com 99,14% de confiabilidade para a projeção de 1 dia. Estes sistemas apresentam com poucas ocorrências de falhas durante o período de 231 dias de operação, mais precisamente com apenas 2 falhas cada sistema.

Por outro lado, vemos que os sistemas Elevador (95,35%) e Picador (95,76%) desta máquina tiveram a maior quantidade de falhas.

As muitas falhas no sistema Picador podem ser justificadas pela presença de componentes como as facas, componente este que sofre impactos diretos com pedras e materiais ferrosos durante a colheita. Este resultado do sistema Picador também é comprovado por Lunarti (2023), apresentando que a taxa de

falha das facas de colhedoras pode ter parâmetros de forma (β) variados, indicando falhas por desgaste, ou até falhas aleatórias (impactos operacionais).

Ademais, as falhas no sistema Elevador se devem por ter componentes como as taliscas, material que se desgasta facilmente devido ao transporte constante da cana picada até o extrator secundário. É comum adotar-se a prática de realizar o rodízio de troca de taliscas frequentemente, pois assim como as facas do picador, são componentes que se desgastam facilmente e precisam serem trocados em alta frequência.

5 CONCLUSÃO

Por fim, temos a conclusão de que, com os avanços tecnológicos sobre a produção da cana-de-açúcar, o investimento em confiabilidade se destacou muito em empresas que buscam estratégias além da ótica tradicional, já que, a partir dos dados de confiabilidade dos sistemas de colhedoras de cana-de-açúcar, conseguimos uma melhora na eficiência e uma redução de custos, direcionando melhor planos de ações para correção da indisponibilidade desse tipo de equipamento.

Com o estudo de caso apresentado no presente trabalho, a partir da coleta de dados de cinquenta colhedoras de cana-de-açúcar de uma empresa de bioenergia, vimos que, mesmo ocorrendo reformas do equipamento durante o período de entressafra, a cada pulso de tempo, a cada aumento da projeção de horas, a confiabilidade diminui mês a mês. Tanto que, por um lado, foi apresentado situações de colhedoras que a cada 5 horas de funcionamento direto, ou seja, sem parada, obtivemos uma confiabilidade de 92% no mês de abril. Por outro, no período de fim da safra, no mês de novembro, vemos uma queda de confiabilidade, quantificando cerca de 88%, isso devido ao uso excessivo do equipamento causando um desgaste de componentes e uma redução de vida útil.

Além disso, falando de sistemas de colhedoras, a construção do gráfico RBD, calculado multiplicando todos os blocos de confiabilidade, nos trouxe uma visão sobre alguns sistemas como Despontador e Transmissão, que apresentaram poucas ocorrências de falhas durante o período de 231 dias de operação, mais precisamente com apenas 2 falhas cada sistema. Vimos também

que, sistemas como Elevador e Picador tem a maior quantidade de falhas, onde tiramos conclusões sobre a presença de componentes de desgaste repentino devido aos impactos operacionais, como as facas e taliscas. Por isso, estratégias importantes devem ser adotadas como realizar o rodízio de troca de taliscas e facas em ínfimo intervalo de dias, já que são componentes que se desgastam facilmente e precisam serem trocados em alta frequência.

REFERÊNCIAS

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

AZEVEDO, R. V.; FERREIRA, R. J.; FURTADO, P. A. de. A.; MOURA, M. das. C.; DROGUETT, H. L. **DIAGRAMA DE BLOCOS E PROCESSOS DE RENOVAÇÃO GENERALIZADOS PARA MODELAGEM DE BANCOS DE DADOS DE CONFIABILIDADE.** CLAIO SBPO, Congresso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa, Rio de Janeiro, p. 04-12, 24-28 setembro, 2012.

BECHTOLD, M. J. Manutenção Mecânica. Florianópolis: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Departamento Regional de Santa Catarina, 2010.

BESSEGATO, Lupércio França. Testes de Aderência – Teste de Bondade de Ajuste. UFMG, 2013. Disponível em: <http://www.bessegato.com.br/UFMG/bondade.htm>. Acesso em: 24/06/2023.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira. Cana-de-açúcar - Terceiro levantamento, safra 2018/19, dezembro/2018. Brasília, 2018.73 p. <https://www.conab.gov.br>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Série Histórica das Safras. Brasília: 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 24/06/2023.

DEERE & COMPANY. Manual Técnico - Colhedoras de Cana-de-açúcar John Deere 3520 e 3522. Tm100454. Catalão, Goiás, Brasil: John Deere, 2009. 260 p.

DE OLIVEIRA, D. A. **GOFTESTER: APRIMORAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DA BIBLIOTECA LIBFIT EM UMA FERRAMENTA PARA TESTES DE ADERÊNCIA.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação), Universidade Federal de Santa Catarina Departamento de Informática e Estatística, Florianópolis, 2016.

DE MELO, F.C. **Estudo de Caso de Controle Estatístico e Análise de Falhas em Frota de Máquinas Agrícolas.** Monografia (Graduação em Engenharia Automotiva) – Faculdade UNB Gama, Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF, 2018.

E SILVA, L. R. **ESTUDO DA CONFIABILIDADE DA MANUTENÇÃO APLICADA A TRATORES DE ESTEIRA: O CASO DE UMA EMPRESA DE MINERAÇÃO.** Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2019.

FAZOLLI, S. **Metodologia para cálculo da confiabilidade de sistemas complexos na fase de desenvolvimento.** 2009. Dissertação (Doutorado em

Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânicas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1998.

FOGLIATO, F.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FRITSCH, C.; RIBEIRO, J.L.D. **PROCONF: um software orientado para análises de confiabilidade**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 18, Niterói, 1998. Anais... Niterói, 1998.

HELMANN, K. S. **Ponderação sobre os critérios considerados para suportar a tomada de decisão quanto ao momento de se efetuar a manutenção preventiva em processos industriais**. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 26., 2006, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ABEPRO, 2006 1 CD-ROM.

IEEE 1633. IEEE Recommended Practice on Software Reliability. IEEE Standards Association. 1633-2016, Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 261, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/ieeestd.2017.7827907>.

KARDEC, A., NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

Kuo, W., Zuo, M. J., **Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

LAIRA, J. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. [S.I.]: Qualitymark, 2001.

LAW, A. **Simulation modeling and analysis**. 5. ed. London: McGraw-Hill Education, 2015.

LUNARTI, L. F. A. P. **ESTUDO DE CASO DO PROCESSO DE MANUTENÇÃO EM COLHEDORAS DE CANA-DE-AÇÚCAR DE UMA USINA DE BIOENERGIA**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, MG, 2023.

MACHADO, L. de. C.; SANTOS, L. L. R.; ANDRADE, P. C. de. R. **Modelagem dos Dados de Falha de uma Colhedora de Cana-de-açúcar**. Abakós, PUC Minas, Belo Horizonte, v. 10, n. 1, p. 03-17, maio, 2022. ISSN: 2316-9451.

MONTGOMERY, D. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.], 2009. 490 p.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.; CALADO, Verônica. **Estatística Aplicada E Probabilidade Para Engenheiros**. Grupo Gen-LTC, 2000.

NOVO, J. V. S. **Análise de confiabilidade de sistemas de máquinas colhedoras de cana-de-açúcar usando o modelo q-Weibull**. Universidade Federal da Bahia, 2019.

NR-12. Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos. Norma Regulamentadora número 12, Ministério do Trabalho e Previdência Social, p. 73, 2017.

NUNES, E. L. **Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise de implantação em uma sistemática de manutenção preventiva consolidada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

OLIVEIRA, L. G. **Desenvolvimento de aplicativo para estimativa de propriedades volumétricas, residuais e termodinâmicas e avaliação de equações cúbicas de estado.** João Pessoa, 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Stalk Harvesting Systems. In: *Sugarcane: Agricultural Production, Bioenergy and Ethanol*. Elsevier, 2015. cap. 10, p. 205–239. ISBN 9780128022399. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-802239-9.00010-4>.

RIPOLI, T. C.; PARANHOS, S. B. **Sistemas de colheita - cana-de-açúcar – cultivo e utilização.** In: Fundação Cargill. Campinas, São Paulo, Brasil: [s.n.], 1897. v. 2, p. 519–593. Citado na página 38.

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

VACCARO, G. L. R. **Modelagem e análise da confiabilidade de sistemas.** 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Cap. 2, 1997.

VERSSANI, Bruna Aparecida Wruck. Modelo de regressão para sistemas reparáveis: um estudo da confiabilidade de colhedoras de cana-de-açúcar. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11134/tde-22012019-173525/>. Acesso em: 16 out. 2024.

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

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **Manual de Gestão da Manutenção.** Volume II. 1. ed. Brasília DF: Editora Engeteles, 2021. 292 p.

XENOS, H. G. D. **Gerenciando a Manutenção Produtiva.** Belo Horizonte, Brasil: [s.n.], 1998. 302 p.

ZAGHETTO, S. L. et al. **Modelagem de risco de falha de equipamentos**

elétricos de subestações. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 19., 2007. Anais [...]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

ZAR,J. **Biostatistical Analysis.** 4 ed. Prentice Hall. 1994.