



## Modelagem dos Dados de Falha de uma Colhedora de Cana-de-açúcar\*

Modeling the Failure Data of a Sugarcane Harvester

Laís de Campos Machado<sup>1</sup>  
Lara Letícia Rocha Santos<sup>2</sup>  
Paulo César de Resende Andrade<sup>3</sup>

### Resumo

A análise de confiabilidade é uma metodologia utilizada para descrever o comportamento de falhas em equipamentos. O presente trabalho tem por objetivo modelar o tempo de vida de colhedoras nas operações de colheita de uma indústria sucroalcooleira. O procedimento de pesquisa utilizado foi o estudo de caso. Foram feitos testes em um equipamento que falhou. O método gráfico e os testes de aderência de Qui-Quadrado ( $\chi^2$ ) e Kolmogorov-Smirnov ( $K-S$ ) foram utilizados para verificar a distribuição que melhor modela a amostra de dados. Foram utilizados os softwares ProConf e R para realizar as análises. Os parâmetros da distribuição modeladora foram determinados. Os gráficos das funções de confiabilidade  $R(t)$  e de risco  $h(t)$  foram apresentados. O tempo médio de falha das colhedoras é de 6,34 minutos. Metade dos equipamentos falhou próximo ao tempo de 6,40 minutos. As distribuições Gama, Lognormal, Normal e Weibull se mostraram eficientes na análise. No entanto, foi concluído que a Weibull é a distribuição que melhor modela os dados. O parâmetro gama da distribuição Weibull é de 4,8275, indicando que o equipamento se encontra na fase de envelhecimento. Concluímos que a manutenção adequada para ele é a manutenção corretiva.

**Palavras-chave:** Confiabilidade. Colhedora de cana. Comportamento de falhas. Tempo de vida. Weibull.

\*Submetido em 14/05/2021 - Aceito em 13/02/2022

<sup>1</sup>Bacharelanda em Ciência e Tecnologia, Instituto de Ciência e Tecnologia, UFVJM, Brasil – laiscm88@gmail.com.

<sup>2</sup>Bacharelanda em Ciência e Tecnologia, Instituto de Ciência e Tecnologia, UFVJM, Brasil – lararocha515@gmail.com.

<sup>3</sup>Professor Associado II do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Brasil – paulo.andrade@ict.ufvjm.edu.br.

### Abstract

Reliability analysis is a methodology used to describe the behavior of equipment failures. The present work aims to model the life span of harvesters in the harvesting operations of a sugar and alcohol industry. The research procedure used is the case study. Tests were performed on an equipment that failed. The graphical method and the Chi-Square ( $\chi^2$ ) and Kolmogorov-Smirnov ( $K-S$ ) adhesion tests were used to verify the distribution that best model the data sample. ProConf and R software were used to perform the analyzes. The parameters of the modeling distribution were determined. The graphs of the confidence functions  $R(t)$  and risk  $h(t)$  were obtained. The average failure time of the harvesters is 6.34 minutes. Half of the equipment failed around 6.40 minutes. The Gamma, Lognormal, Normal and Weibull distributions are considered efficient in the analysis. However, we concluded that Weibull is the distribution that best models the data. The gamma parameter of the Weibull distribution is 4.8275, indicating that the equipment is in the aging phase. In conclusion, proper maintenance for it should be a corrective one.

**Keywords:** Reliability. Sugarcane harvester. Failure behavior. Lifetime. Weibull.

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de matérias-primas agrícolas, como a cana-de-açúcar, é bastante adotado desde o período colonial brasileiro. Além do biocombustível etanol e do açúcar, a biomassa da cana vem sendo muito aproveitada para produção de energia renovável. Com o aumento da demanda dessa matéria-prima o processo de mecanização vem sendo caracterizado pela implantação de maquinários cada vez mais modernos, elevando a produtividade das empresas sucroalcooleiras (NOVO, 2019).

Hoje, a colheita de cana-de-açúcar está sendo toda mecanizada, mais comumente em casos de grandes produtores, e o equipamento utilizado para esse processo é a colhedora. Este equipamento é de suma importância na empresa sucroalcooleira, não só pela alta tecnologia, mas também por possuir uma função sensível durante toda a produção (NASCIMENTO *et al.*, 2020). Neste trabalho foram estudadas as paradas de uma colhedora de cana, case IH A8810, para o corte de cana crua.

A produção da fábrica deve ter uma sequência constante e estável. Se a colhedora sofre alguma parada para uma manutenção corretiva, incapacita o maquinário de ter uma boa produtividade, além de causar aumento nos custos de produção (NASCIMENTO *et al.*, 2020). Diante disso, as empresas estão cada vez mais procurando abordagens para melhorar suas estratégias de manutenção. Com isso, a análise da confiabilidade tem sido de suma importância para reduzir os custos e melhorar a eficiência assegurando suas funcionalidades e aumentando sua produtividade (NOVO, 2019).

Dessa maneira, para realizar análise da confiabilidade a partir do comportamento da taxa de falhas do equipamento, utilizam-se métodos estatísticos a fim de associar distribuições de probabilidades para seu tempo de sobrevivência. O uso de distribuições para descrever o comportamento de um conjunto de dados, coletados de um determinado dispositivo, pode prever o comportamento para que medidas de melhoria possam ser antecipadas. Parâmetros e intervalos de confiança estatísticos podem ser usados para descrever esses comportamentos (VACCARO, 1997).

Algumas das distribuições que são trivialmente utilizadas para a modelagem da Confiabilidade são as distribuições Exponencial, Gama, Lognormal e Weibull. Para que o modelo resultante possa ser mais facilmente utilizado nas técnicas de análise, é necessário determinar uma amostra de dados de acordo com o tempo de falhas. A partir disso, deve-se primeiro determinar qual distribuição melhor representa os dados e, em seguida, obter um modelo de parâmetro da distribuição da falha.

Há uma variedade de métodos estatísticos que podem ser usados para determinar o melhor ajuste dos dados a uma distribuição, estimar os parâmetros da distribuição e calcular o intervalo de confiança de cada parâmetro. Podemos nos concentrar em técnicas gráficas e analíticas que permitem avaliar melhor ajuste sem o uso de técnicas matemáticas avançadas (BARBOSA, 2008). Tais métodos serão abordados durante o desenvolvimento das análises.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o uso de ferramentas gerenciais no suporte

ao sistema de manutenção planejada aplicada em uma indústria sucroalcooleira, analisando o desempenho da colhedora de cana *case IH A8810*.

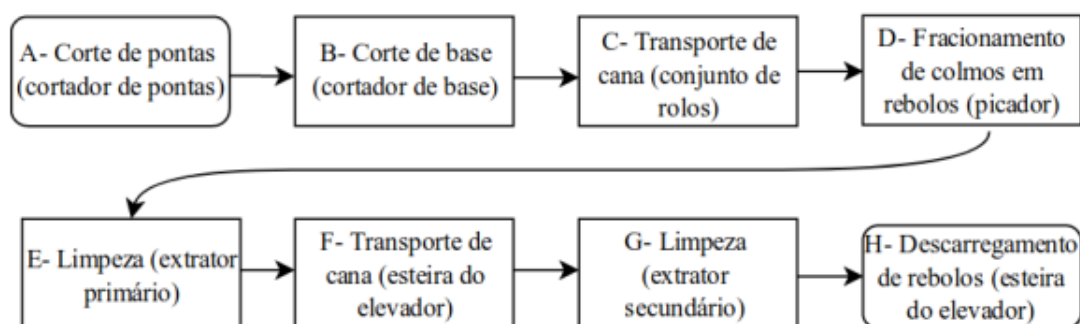
## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Colhedora de cana-de-açúcar

De acordo com a Norma Regulamentadora número 12 (NR-12, 2017), colhedora de cana-de-açúcar é uma máquina que permite que a colheita seja feita uniformemente por possuir um subsistema de corte capaz de realizar o corte de acordo com o perfil do solo. Esse maquinário conduz a cana até o veículo de transporte por meio do subsistema que tem como função o deslocamento da matéria-prima (NOVO, 2019).

Na Figura 1 é apresentado um esquema do funcionamento do corte e fracionamento da cana pela máquina colhedora do tipo *chopper*.

**Figura 1 – Representação esquemática do fluxo de corte e fracionamento de cana-de-açúcar utilizando máquinas colhedoras do tipo *chopper***



Fonte: Retirado de (NOVO, 2019)

### 2.2 Confiabilidade e distribuições de probabilidade associadas

Na década de 1950, houve uma necessidade de analisar as decorrentes falhas em equipamentos eletrônicos muito usados na área militar. Para atender a estas necessidades foram desenvolvidos estudos matemáticos aplicados a componentes de um sistema, permitindo garantir manutenção e qualidade em suas ferramentas. Nesse contexto surgia então a Confiabilidade. De acordo com a norma NBR – 5462 (ABNT, 1994), confiabilidade é a capacidade de um determinado item, componente, equipamento, máquina ou sistema desempenhar a sua função, de acordo com as condições de operação especificadas, em um intervalo de tempo determinado.

A confiabilidade está inserida na definição de Manutenção, no qual diz que se deve garantir a disponibilidade da função dos equipamentos, de modo a manter um processo com

confiabilidade, segurança e custo satisfatório, visando a preservação do meio ambiente (KARDEC; NSCIF, 2009). Percebe-se o surgimento de um novo termo: Disponibilidade, que pode ser muito confundido com confiabilidade. Entretanto, disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma determinada função; já a confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar uma função sob condições específicas, ambos em um intervalo de tempo determinado (ABNT, 1994).

Outro conceito que está associado à confiabilidade é a qualidade. De acordo com Fogliato e Ribeiro (2009), qualidade é a capacidade de projetar produtos que possam atender às necessidades e desejos do usuário, incorporando características relativas a aspectos de estética ou de desempenho do produto. Sendo assim, percebe-se que a confiabilidade em um sistema, produto ou equipamento, implica na qualidade desse. Por consequência disso, torna-se muito viável que organizações invistam em recursos para fornecer produtos e serviços confiáveis, que satisfaçam as exigências de qualidade.

A confiabilidade pode ser obtida através de uma modelagem dos tempos entre falhas do item em estudo, 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, Normal e Weibull (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009).

A distribuição Exponencial é a mais comumente utilizada para componentes ou sistemas que apresentam uma taxa de falha constante, ou seja, quando apresenta uma probabilidade de falhar a qualquer momento, independentemente de ser novo ou ter anos de uso (VACCARO, 1997). Sua função de distribuição de probabilidade acumulada corresponde a  $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ , sua função de densidade de probabilidade  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$  com função de risco  $h(t) = \lambda$  e função de confiabilidade  $R(t) = e^{-\lambda t}$ ; sendo  $\lambda$  seu parâmetro.

A distribuição Gama é uma das mais gerais distribuições, pois diversas distribuições são caso particular dela como, por exemplo, a exponencial. Essa distribuição é utilizada para modelagens de Confiabilidade e tem como suas principais aplicações à análise de tempo de vida de produtos. Porém, pode ser inapropriado para alguns produtos pois dependendo dos valores assumidos por seus parâmetros sua modelagem altera-se rapidamente (VACCARO, 1997).

A Lognormal é uma distribuição amplamente utilizada em ajustes de dados por apresentar uma grande quantidade de formatos, de acordo com seus parâmetros. É uma distribuição flexível, sendo provável que uma ação de reparo completa aumente com o decorrer do tempo (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009). A taxa de risco deste modelo apresenta comportamentos diversos, de acordo com os valores dos parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$ .

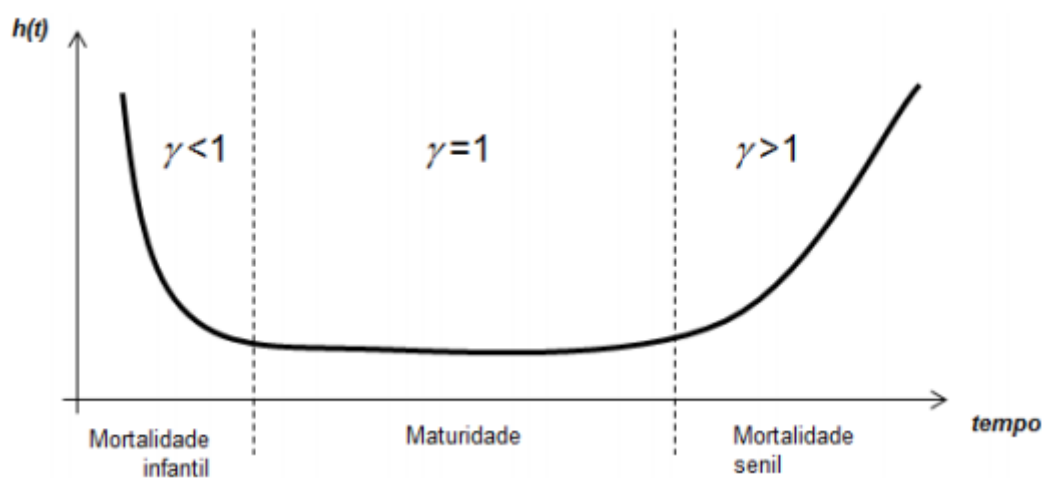
A distribuição Weibull é o modelo mais empregado em análises de Confiabilidade por possuir uma grande variedade de formas, em razão de sua capacidade de representar os mais diversos comportamentos para taxa de risco (SANTOS, 2016). Isso é, pode modelar uma função de risco na fase crescente, decrescente ou permanecendo constante, permitindo que ela descreva qualquer fase da vida útil de um produto. Sua função de distribuição de probabilidade acumulada corresponde a  $F(t) = 1 - e^{-(\frac{t}{\theta})^\gamma}$  sua função de densidade de probabilidade é dada por  $f(t) = \frac{\gamma}{\theta^\gamma} t^{\gamma-1} e^{-(\frac{t}{\theta})^\gamma}$ , com função de risco  $h(t) = \frac{\gamma}{\theta^\gamma} t^{\gamma-1}$  e função de confiabilidade

$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma}$ . Os parâmetros  $\gamma$  e  $\theta$  são respectivamente denominados *parâmetro de escala* (ou característica de vida) e *parâmetro de forma*.

A modelagem dos tempos até as falhas é essencial para a análise de confiabilidade, sendo que vários estudos foram realizados recentemente (SANTOS *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2017; LEAL; ANDRADE, 2018; BARBOSA; ANDRADE, 2019; ARAUJO; ANDRADE, 2020; MACIEL; ANDRADE, 2021).

Por meio da curva da banheira, é possível analisar o comportamento da taxa de falha de um equipamento ao longo do tempo. Isto representa genericamente a função de risco  $h(t)$  durante o ciclo de vida. A curva da banheira é caracterizada por três períodos, conforme representado na Figura 2. São eles: mortalidade infantil; fase de maturidade; e mortalidade senil.

**Figura 2 – Curva da Banheira e o ciclo de vida dos equipamentos**



Fonte: Adaptado de Lafraia (2001) e Sellitto (2005)

Para cada fase da curva, segundo Sellitto (2005), é possível estabelecer uma estratégia de manutenção que se adequará ao estado do equipamento. Para a primeira fase (mortalidade infantil) a taxa de falhas é alta, mas acontece de forma decrescente. Para esta fase, o ideal é a utilização da manutenção corretiva, identificando e corrigindo deficiências no projeto ou instalação do equipamento. Na segunda fase, da maturidade, é possível perceber que a taxa de falhas é sensivelmente menor que na fase inicial, oscilando próximo a uma média constante. Nessa etapa o ideal é que se utilize a manutenção preditiva. O último período pode receber diferentes denominações de acordo com o autor. Lafraia (2001) o denomina desgaste. Já Sellitto (2005), o denomina mortalidade senil. Apesar das diferenças nas denominações, ambos os autores concordam que nesta etapa se dá o fim da vida útil do equipamento, acarretando em um número crescente de falhas. Assim, para essa etapa o ideal é a adoção da manutenção preventiva, com o intuito de trocar peças ou equipamentos antes que os mesmos falhem.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Origem e coleta de dados

A pesquisa empregada foi o estudo de caso de uma máquina colhedora de cana case IH A8810. Os dados em questão foram coletados em uma fábrica sucroalcooleira no interior de Minas Gerais.

A empresa disponibilizou o tempo de parada em minutos para ser realizado o corte de cana crua, em regime normal de operação, do dia 10 de outubro de 2020. Esses dados serão apresentados em ordem cronológica na Tabela 1.

**Tabela 1 – Tempo de parada da colhedora de cana, em minutos**

n	Tempo de parada	n	Tempo de parada	n	Tempo de parada
1	5,367	11	6,917	21	7,617
2	6,550	12	5,450	22	9,067
3	6,250	13	5,817	23	9,083
4	5,433	14	4,217	24	7,817
5	6,633	15	5,917	25	7,567
6	4,933	16	9,017	26	4,933
7	4,050	17	6,150	27	6,067
8	7,050	18	8,967	28	6,800
9	7,167	19	4,567	29	5,150
10	4,933	20	6,250	30	6,083

Fonte: Elaborada pelos autores com dados fornecidos pela empresa (2021).

#### 3.2 Análise dos dados

Os dados disponibilizados foram analisados por meio dos programas ProConf (FRITSCH; RIBEIRO, 1998) e R (R CORE TEAM, 2021), programas que possibilitam ajustar a distribuição de tempo de falha para dados de confiabilidade através do uso de gráficos e métodos analíticos.

Os histogramas de frequência das paradas e papéis de probabilidade foram empregados

como métodos gráficos para relacionar as curvas de distribuição de probabilidade, e verificar o modelo que melhor apresenta as aderências aos dados da amostra.

A fim de caracterizar a distribuição de frequência foi utilizado testes de aderência às distribuições de probabilidade. Os testes aplicados para verificação de ajuste dessas distribuições foram o Qui-Quadrado ( $\chi^2$ ) e o Kolmogorov-Smirnov (K-S). O ProConf informa o p-valor e quais distribuições não podem ser rejeitadas (FRITSCH; RIBEIRO, 1998). A aprovação é dada se o p-valor for maior que 5% para os dois testes de aderência. No entanto, se o mesmo é maior que 5% em ambos os testes a distribuição não pode ser rejeitada, significando que ela poderá ser utilizada na modelagem. Em casos que mais de uma distribuição possa ser utilizada, o pesquisador deve justificar por fundamentação teórica a escolha de uma delas.

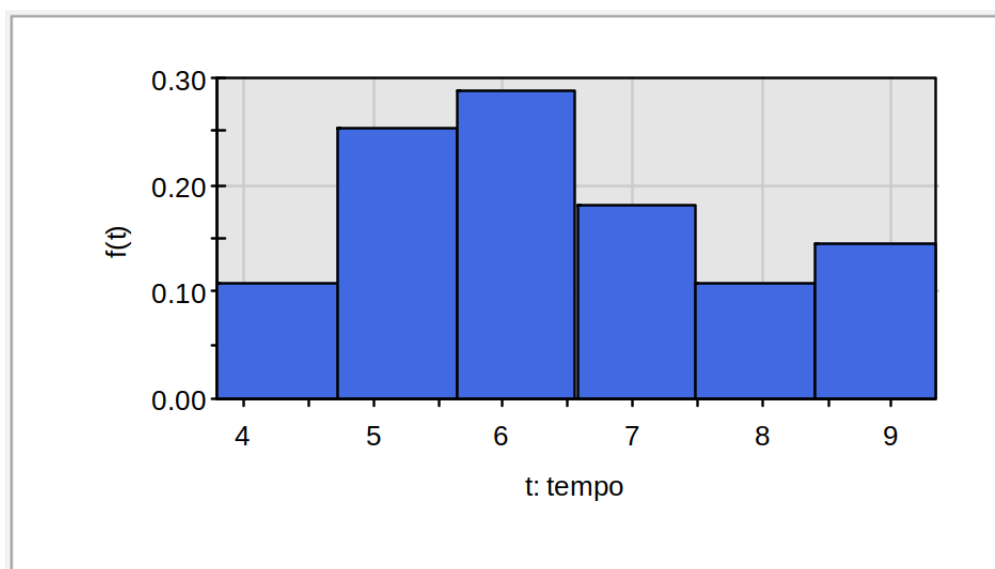
Para verificar a adequação da validação do desempenho dos modelos foi utilizado o Critério de Informação de Akaike – *Akaike's Information Criterion* (AIC). Quanto menor for o valor de AIC, melhor será o ajuste do modelo (AKAIKE, 1998). Para tal foi utilizado o *software* R.

Em seguida, o método de máxima verossimilhança é utilizado para fornecer estimativas dos parâmetros da distribuição da função de distribuição de probabilidade que melhor modelam o conjunto de dados em estudo. Além disso, é fornecida a representação da função de confiabilidade  $R(t)$  e a taxa de risco ou falha  $h(t)$ .

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

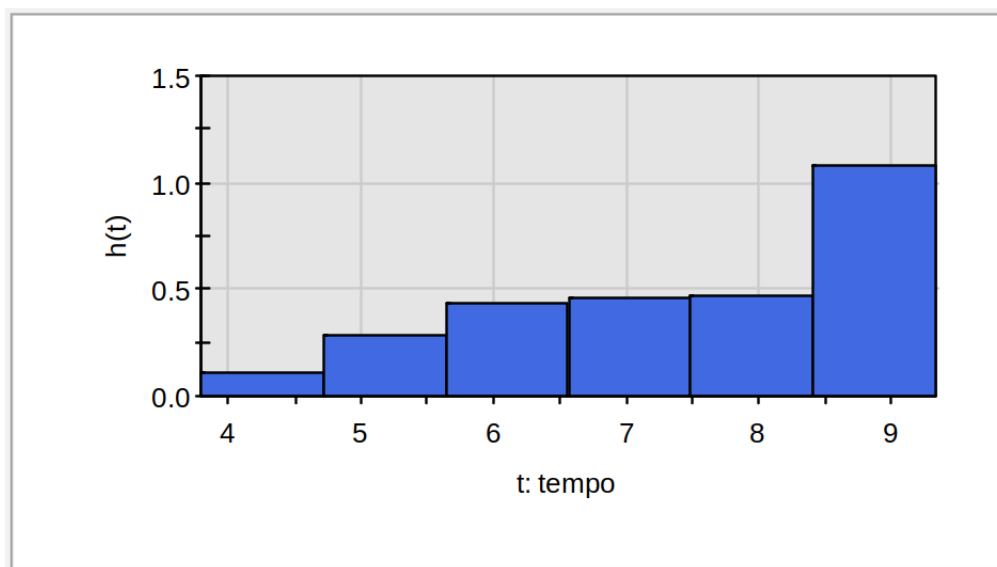
O tempo e a taxa de falhas dos dados observados foram descritos por meio do histograma apresentado nas Figuras 3 e 4, permitindo a realização de inferências iniciais de qual modelo pode proporcionar um melhor ajuste aos dados.

**Figura 3 – Histograma dos Tempos de Falha**



Fonte: Adaptado do ProConf (2021).



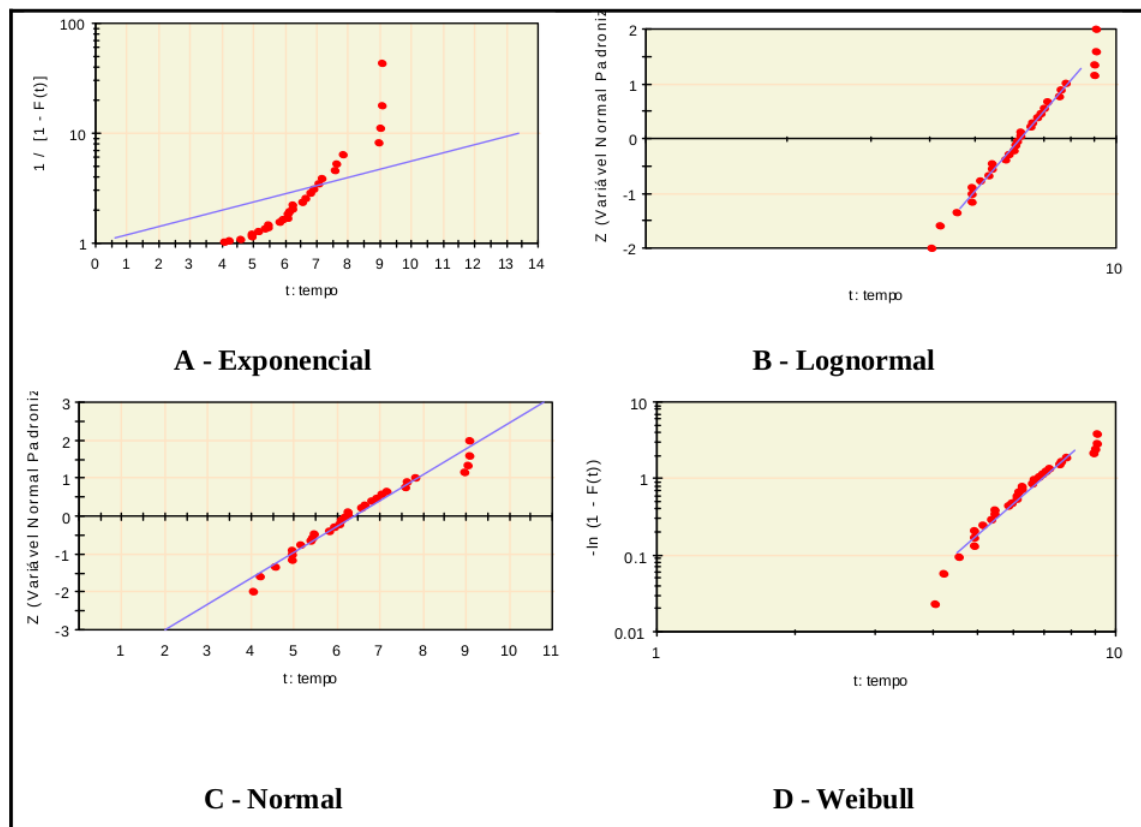
**Figura 4 – Histograma da Taxa de falha**

Fonte: Adaptado do ProConf (2021).

No histograma da Figura 3, os dados descrevem que o maior número de falhas ocorre entre 4,70 e 6,6 minutos. A taxa de falhas possui uma relação crescente, possuindo um ponto crítico em aproximadamente 8,45 minutos, conforme histograma da Figura 4, evidenciando que quanto maior o decorrer do tempo sem manutenção, maior a chance de se ocorrer uma falha. Observa-se que a função de risco é crescente, cuja origem é o próprio desgaste do equipamento. Nessa fase, as falhas tendem a ter defeitos cumulativos. O aumento muito rápido da taxa de falha, normalmente fundamenta o critério de quando peças devem ser substituídas e também determina a vida útil do produto ou sistema.

Na Figura 5 é apresentado o papel de probabilidade correspondente às distribuições Exponencial, Lognormal, Normal e Weibull respectivamente, obtidas por meio do *software ProConf*. O ajuste é tanto melhor quanto mais próximo os pontos estiverem próximos à reta. Os gráficos do papel de probabilidade sugerem que há adequação do ajuste para as funções Lognormal, Normal e Weibull, e que a distribuição Exponencial não aderiu aos dados. Não é possível a implementação do gráfico do papel de probabilidade para função Gama.

**Figura 5 – Papel de probabilidade**



Fonte: Adaptado do ProConf (2021).

Na Tabela 2 são apresentados os testes de aderência Qui-Quadrado (<sup>2</sup>) e Kolmogorov-Smirnov (*K-S*) realizados, onde se verifica analiticamente o p-valor do ajuste, comparando os dados de falha e a distribuição teórica.

**Tabela 2 – Tempo de parada da colhedora de cana, em minutos**

Modelo	$\chi^2$	K-S	Decisão
Exponencial	0,0001	0,0001	Rejeitada
Gama	0,7715	0,3416	Não pode ser rejeitada
Lognormal	0,7885	0,3301	Não pode ser rejeitada
Normal	0,4485	0,2451	Não pode ser rejeitada
Weibull	0,3329	0,2506	Não pode ser rejeitada

Fonte: Elaborada pelos autores com dados extraídos do ProConf (2021).

Os resultados da Figura 5 corroboram com os resultados descritos nos testes de aderência realizados para os modelos supracitados conforme observado na Tabela 2, onde a hipótese de que a população segue o modelo exponencial é rejeitada. Nos demais modelos as hipóteses de nulidade não podem ser rejeitadas.

Diante disso, para definir a função que melhor modela a amostra de dados, foi realizada a comparação das funções densidade de probabilidade pelo critério AIC. Conforme se observa

na Tabela 3, as funções apresentam resultados similares entre si.

**Tabela 3 – Valores do teste Akaike (AIC)**

Distribuição	AIC
Lognormal	109,72
Weibull	111,24
Normal	109,71
Gama	109,98

**Fonte:** Elaborada pelos autores com dados extraídos do *software R* (2021).

A função Normal não é muito utilizada para dados de confiabilidade, a Lognormal é melhor para análise de reparos, o que não é o caso deste trabalho. Sendo assim, de acordo com Fogliato e Ribeiro (2009) a decisão da melhor função é do pesquisador, logo, foi escolhida a *Weibull* para modelar os dados, porque ela é a mais apropriada para a análise do equipamento e seus parâmetros ajustados podem ser utilizados durante os estudos de confiabilidade. Além disso, a distribuição *Weibull* tem a vantagem de ser mais flexível no ajuste de diferentes tipos de dados e de permitir relacionar o seu parâmetro de forma  $\gamma$  à fase da curva da banheira (SELLITTO, 2005).

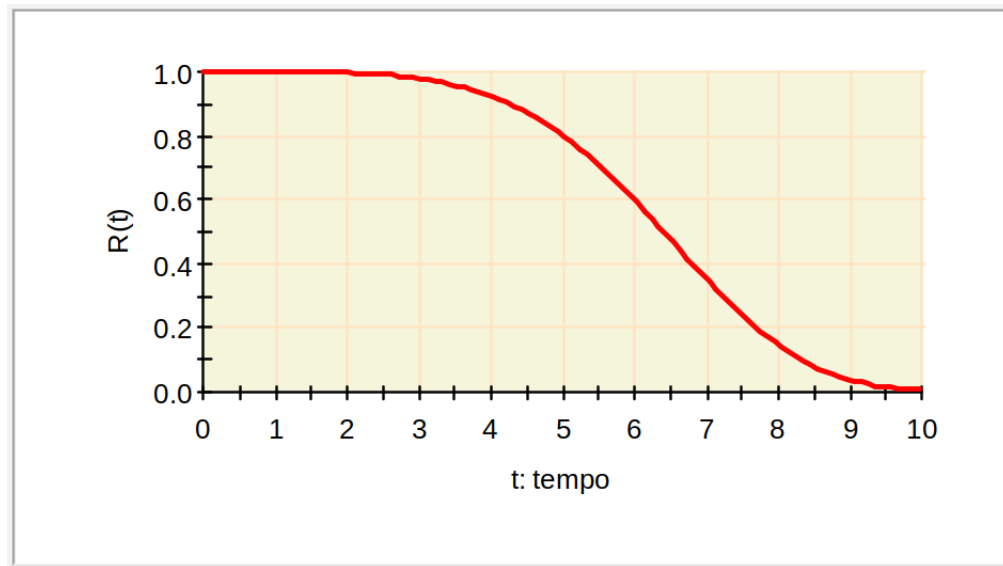
Na Tabela 4 são apresentadas as estimativas ajustadas pelos dados experimentais, considerando a distribuição Weibull. Tendo que, a estimativa do parâmetro gama da função Weibull é igual a 4,82, conclui-se que o equipamento está em fase de envelhecimento, ou seja, não compensa fazer manutenção preventiva e preditiva, apenas manutenção corretiva.

**Tabela 4 – Resultados dos ajustes da função Weibull**

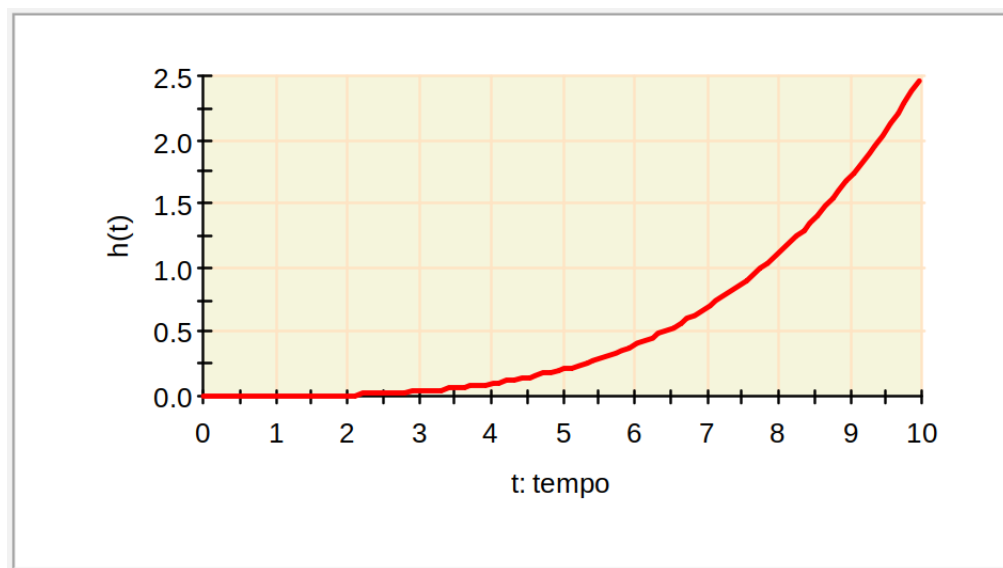
Estimativas	Resultados
$t_{10}$	4,2554
$t_{50}$	6,4054
MTTF	6,3381
$\gamma$	4,8275
$\theta$	6,9671

**Fonte:** Elaborada pelos autores com dados extraídos do *software R* (2021).

As Figuras 6 e 7 ilustram a função de confiabilidade e a taxa de risco, respectivamente, para a distribuição *Weibull* em relação ao tempo em minutos, obtida da estimativa para a colhedora em análise.

**Figura 6 – Função confiabilidade para distribuição de probabilidade Weibull**

Fonte: Adaptado do ProConf (2021).

**Figura 7 – Função de taxa de risco para distribuição de probabilidade Weibull**

Fonte: Adaptado do ProConf (2021).

Observa-se que a confiabilidade sempre será decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita operação decaem conforme ocorra a utilização e o desgaste do equipamento. Pode-se observar também que a taxa de falha ou de risco é crescente, cuja origem é o próprio desgaste do equipamento, na fase final de mortalidade senil. Nessa fase, as falhas tendem a ter defeitos cumulativos. O aumento muito rápido da taxa de falha, normalmente fundamenta o critério de quando peças devem ser substituídas e também determina a vida útil do produto ou sistema.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitos estudos estatísticos sobre manutenção e confiabilidade usam dados simulando o tempo até a falha ou são realizados submetendo o equipamento a estresse estimando sua vida útil. Neste estudo foi usado dados reais com o equipamento funcionando normalmente, permitindo a verificação por análise estatística que os dados corroboram para o uso de distribuições já conhecidas.

As funções densidade de probabilidade Gama, Lognormal, Normal e Weibull, apresentaram-se como eficientes na modelagem das falhas da máquina, objeto deste estudo. Porém a Weibull é uma das distribuições mais importantes na modelagem de confiabilidade devido à sua flexibilidade e capacidade de representar as amostras dos tempos de falha com comportamentos diferentes.

Foi possível obter as medidas de confiabilidade: tempo médio até a falha, valores limites de tempos, nos quais 10% e 50% das falhas ocorreram, bem como estimar os parâmetros das distribuições ajustadas.

Analisando os resultados conclui-se que a máquina cortadora atingiu a fase de envelhecimento, portanto, o tipo de manutenção adequado para mantê-lo, consiste na manutenção corretiva. Por fim essas análises quantitativas dos tempos de falhas do equipamento são relevantes para determinar estratégias de manutenção a ser realizadas pela empresa.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: [s.n.], 1994.
- AKAIKE, H. Teoria da informação e uma extensão do princípio da máxima verossimilhança. In: **Selected papers of hirotugu akaike**. [S.l.]: Springer, 1998. p. 199–213.
- ARAUJO, F. A.; ANDRADE, P. C. de R. Reliability Analysis in the Software R. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)**, v. 7, p. 50–57, 2020.
- BARBOSA, F. C. S.; ANDRADE, P. C. de R. Análise de falhas em equipamentos e a importância do planejamento da manutenção: uma aplicação em uma usina sucroalcooleira. **ForScience: revista científica do IFMG**, Formiga, v. 7, n. 2, e00638, jul./dez. 2019.
- BARBOSA, J. P. **Modelagem Da Confiabilidade De Equipamentos Por Combinações Ou Extensões De Distribuições De Weibull**. UFES – Universidade Federal Do Espírito Santo, 2008.
- 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., 1998, Niterói. **Anais[...]**. Niterói, 1998.
- KARDEC, A.; NSCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009.
- LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- LEAL, V. J.; ANDRADE, P. C. de R. Modelagem dos dados de falha de um caminhão fora de estrada. **ForScience: revista científica do IFMG**, v. 6, n. 3, 2018.
- MACIEL, G. A.; ANDRADE, P. C. de R. Modelagem dos dados de falha de uma bomba de refrigeração de alto-forno. **Revista Thema**, Pelotas, v. 19, p. 721–730, 2021.
- NASCIMENTO, D. C. d. *et al.* Um estudo de caso de engenharia de confiabilidade de colhedoras de cana-de-açúcar. **Gestão & Produção**, v. 27, n. 4, 2020.
- NOVO, J. V. S. **Análise de confiabilidade de sistemas de máquinas colhedoras de cana-de-açúcar usando o modelo q-Weibull**. 2019. Universidade Federal da Bahia, 2019.
- NR-12. **Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. Norma Regulamentadora. Ministério do Trabalho e Previdência Social, 2017. 73 p.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021.
- SANTOS, I. P. **Introdução à Análise de confiabilidade: Uma Aplicação ao Setor de Transportes**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Estatística Aplicada) — Departamento de Estatística do Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2016.

SANTOS, M. M. de M. *et al.* Modelagem do tempo de vida de um inversor de frequência. **ForScience: revista científica do IFMG**, Formiga, v. 5, n. 3, 2017.

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

SILVA, E. D. C. *et al.* Análise de Dados de Falha de um Transmissor de Fibra Óptica. **Revista Thema**, Pelotas, v. 14, n. 4, p. 259–266, 2017.

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. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/128105/000199240.pdf?sequence=1>>.