

ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO EM USINA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL COM DUAS LINHAS DE MOAGEM UTILIZANDO A ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

MAINTENANCE STRATEGY IN A SUGAR AND ALCOHOL PLANT WITH TWO MILLING LINES USING RELIABILITY ENGINEERING

Timóteo Simão Ferreira*  E-mail: timoteo_ferreira@hotmail.com

Jorge Alberto Achcar**  E-mail: achcar@fmrp.usp.br

*Universidade de Araraquara (UNIARA), Araraquara, SP, Brasil.

**Universidade de São Paulo (USP), Ribeirão Preto, SP, Brasil.

Resumo: Este artigo teve como objetivo analisar a estratégia de manutenção em uma usina de açúcar e álcool localizada no estado de São Paulo, Brasil, utilizando dados de MTTR de duas linhas de processamento de cana sob a perspectiva da engenharia de confiabilidade. A pesquisa, caracterizada como um estudo de caso, empregou técnicas de modelagem estatística para analisar os tempos de reparo para todas as falhas nas moendas durante um período específico. Os tempos de reparo foram modelados utilizando uma distribuição log-normal para os dados na escala original ou uma distribuição normal para os dados transformados pelos logaritmos na base natural dos tempos de reparo. Embora os tempos médios de reparo tenham sido estatisticamente semelhantes para as duas moendas, a análise estatística revelou a influência de diversos fatores na duração dos reparos em ambas. Além disso, o estudo identificou questões cruciais para a estratégia de manutenção da empresa, destacando resultados com implicações significativas para melhorar o desempenho da área de manutenção e a confiabilidade dos equipamentos, contribuindo para a maior competitividade da empresa.

Palavras-chave: Modelos de confiabilidade. Gestão da manutenção. Análise estatística. Tempos de manutenção. Cana-de-açúcar. Etanol.

Abstract: This study aims to analyze the maintenance strategy in a sugar and alcohol plant located in the state of São Paulo, Brazil, using MTTR data from two sugarcane processing lines from the perspective of reliability engineering. The research, characterized as a case study, employed statistical modeling techniques to analyze repair times for all mill failures during a specific period. Repair times were modeled using a log-normal distribution for data on the original scale or a normal distribution for data transformed by logarithms on the natural basis of repair times. Although the average repair times were statistically similar for the two mills, the statistical analysis revealed the influence of several factors on the duration of repairs in both. Furthermore, the study identified crucial issues for the company's maintenance strategy, highlighting results with significant implications for improving the performance of the maintenance area and the reliability of equipment, contributing to the company's greater competitiveness.

Keywords: Reliability models. Maintenance management. Statistical analysis. Maintenance times. Sugar cane. Ethanol.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa uma posição de destaque na economia mundial, sendo amplamente reconhecido pelo seu papel fundamental no processo produtivo da cana-de-açúcar, amplamente utilizado nas usinas sucroalcooleiras, que figura como o quarto setor mais influente da economia nacional.

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

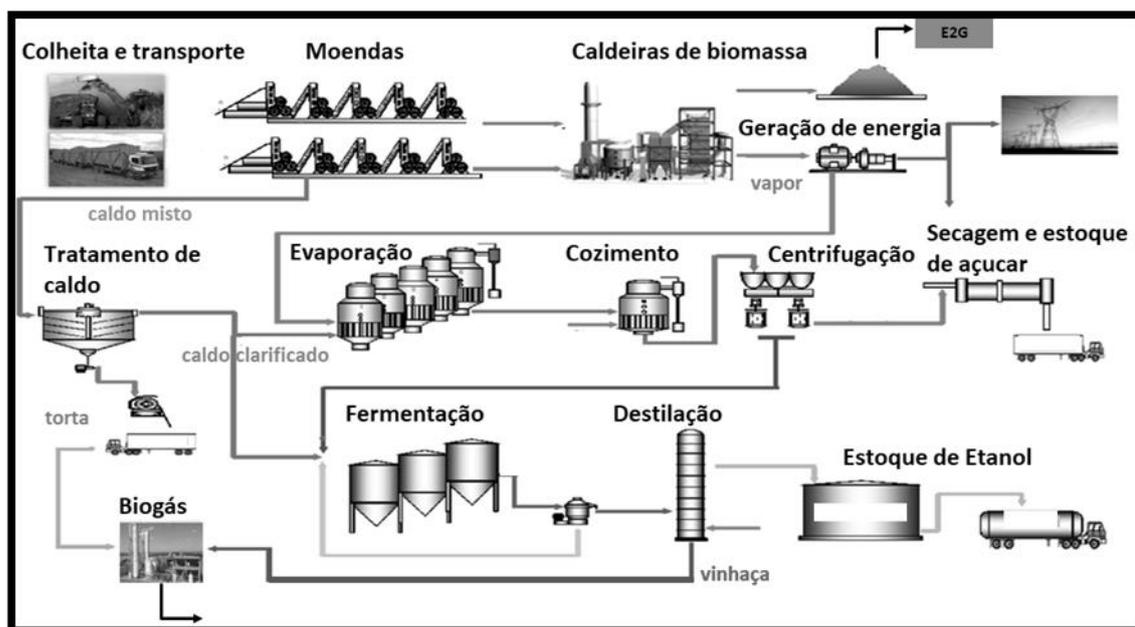
O processo produtivo nas usinas sucroalcooleiras inicia-se com a colheita mecanizada da cana-de-açúcar onde a cana é separada da palha e, em seguida, é picada e transportada por caminhões. Nas usinas, a cana passa pelo processo de moagem e sulfitação, sendo que o caldo mais rico em sacarose é direcionado à produção de açúcar, enquanto as moagens subsequentes são destinadas à fermentação para a obtenção de etanol (Tonon Filho, 2013). Atualmente, as usinas adotam um conceito de economia circular, aproveitando todas as partes da cana, inclusive o bagaço, que é utilizado como fonte de geração de energia elétrica (Lima, 2011). Nos últimos anos, acrescentou-se a produção de energia elétrica a partir da produção do biogás que utiliza biodigestores de vinhaça e torta que são resíduos da produção (salomon; lora, 2005) e a produção adicional de etanol de segunda geração, que é produzido utilizando-se o bagaço da cana-de-açúcar (Buckeridge; Grandis; Tavares, 2019). Esse processo pode ser observado na Figura 1.

A otimização desse processo de produção é de grande importância para garantir a competitividade e a eficiência desse setor estratégico. O presente estudo explora os desafios relacionados à manutenção nesse contexto, com o objetivo de melhorar a confiabilidade e reduzir os tempos de parada dos equipamentos utilizados nas usinas de produção.

As estratégias de manutenção têm evoluído de forma significativa conforme observado na literatura, uma vez que essas estratégias englobam aplicações em uma grande variedade de equipamentos que vão além dos equipamentos simplesmente

mecânicos, incluindo componentes eletrônicos, hidráulicos, eletromecânicos, de software e até mesmo aspectos humanos (Alsyouf, 2009). Uma gestão inadequada da manutenção em instalações industriais pode resultar em reparos de longa duração, acarretando grandes perdas financeiras para as empresas (Vishnu; Regikuma, 2016).

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



Fonte: Autor (2024).

O objetivo principal da manutenção em uma planta industrial é minimizar o tempo de inatividade e manter os equipamentos em condições operacionais com o menor custo possível (Vishnu; Regikuma, 2016). Diversos métodos de manutenção têm sido desenvolvidos para atingir esse objetivo, incluindo a manutenção corretiva, preventiva, preditiva, manutenção produtiva total (TPM) e manutenção centrada na confiabilidade (RCM), como discutido por Mobley (2002). Uma estratégia eficiente de manutenção muitas vezes envolve uma combinação adequada desses métodos (Farrero *et al.*, 2002), com a RCM (Manutenção Centrada na Confiabilidade) sendo um programa que integra técnicas de engenharia de manutenção com uma abordagem sistemática (Fogliatto; Ribeiro, 2008; Moubrey, 1997).

A área de manutenção industrial apresenta muitos estudos aplicados a vários setores industriais conforme observado na literatura (ver por exemplo, Afefy, 2010; Smith, 1993; Khamis;Hiren, 2000; Munozcevallos; Macias, 2022; Abed; Mutlag, 2020;

Balaso; Jagtap, 2024; Zeng, 1997; Dzulyadain *et al.*, 2021; Sharma; Bhattraï, 2020; Mohammed *et al.*, 2020).

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

Assim como Komninakis (2017) avaliou a eficácia da estratégia de manutenção de uma indústria alimentícia utilizando modelagem estatística aplicada ao tempo médio de reparo (MTTR) e ao tempo médio entre falhas (MTBF) de uma linha de produção composta por seis máquinas de embalagem onde os dados coletados foram modelados usando distribuições de probabilidade Log-normal e Weibull, permitindo uma análise detalhada do desempenho das máquinas e da eficiência das práticas de manutenção adotadas. Este estudo, de natureza aplicada e abordagem quantitativa, emprega técnicas de modelagem estatística para analisar especialmente os tempos de parada (MTTR) de duas moendas durante um período de seguimento entre os anos de 2019 e 2023. Vários fatores, como turnos, causas de paradas, meses e anos, são considerados na análise estatística como possíveis covariáveis importantes afetando os tempos de parada dos equipamentos de produção. A identificação desses fatores é essencial para aprimorar a estratégia de manutenção da indústria (Mengue; Sellito, 2013; Raposo, 2011). Além disso, este estudo visa desenvolver um modelo estatístico de confiabilidade para servir de subsídio nas análises técnicas de manutenção e otimizar a disponibilidade das moendas, contribuindo para o aumento da produtividade e estabilidade no fornecimento de matéria-prima (cana-de-açúcar) para as usinas de produção.

A estrutura deste artigo consiste na apresentação da fundamentação teórica, abordando os principais tópicos mencionados no contexto deste estudo, seguida de uma descrição mais detalhada da base dos dados e da metodologia utilizada. Por fim, são discutidos os resultados obtidos no estudo e as conclusões finais, destacando as contribuições deste estudo para a melhoria da gestão de manutenção na indústria açucareira brasileira.

1.1. Problema de pesquisa

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

No contexto de uma usina de processamento de cana-de-açúcar, o foco deste estudo, a política de manutenção tradicionalmente se divide em dois períodos distintos: colheita e entressafra. Durante o período de colheita, que se estende de abril a novembro, a usina opera continuamente, com paradas mensais de 6 horas alternando entre as duas moendas, além de manutenções planejadas. Nesse período, também são coletados dados e demandas que servirão de base para planejar as manutenções futuras.

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

O objetivo principal deste estudo é avaliar especificamente os tempos de duração de reparos (MTTR - Mean Time To Repair) em duas moendas de uma indústria de açúcar e etanol. A avaliação do MTTR neste processo é importante, pois além de ser o indicador de maior impacto, contribui para a estratégia da manutenção. Para alcançar esse propósito, são aplicadas análises estatísticas aos dados de duração de reparos, seguindo a abordagem de estudos previamente apresentados na literatura (Sellito, 2005; Mengue; Sellito, 2013; Komninakis, 2017; Komninakis *et al.*, 2018). O intuito principal é identificar possíveis áreas que podem ter melhorias contribuindo para a redução dos tempos de parada dos equipamentos, otimizando assim a eficiência da usina e fortalecendo sua competitividade no mercado.

1.2. Aspectos metodológicos

A pesquisa realizada neste estudo é de natureza descritiva, pois visa desenvolver um modelo estatístico que descreva as ocorrências de falhas nos equipamentos de uma indústria e construir um perfil com suas características distintivas. Essa análise será conduzida com base nas informações contidas e registradas em um banco de dados exclusivo da empresa em questão. A coleta de dados é efetuada através da extração de informações sobre interrupções para reparos disponíveis no sistema de gestão da empresa e em seu banco de dados. A abordagem adotada é de cunho quantitativo, e o método empregado consiste na modelagem estatística (Montgomery; Runger, 2010).

2 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

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

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

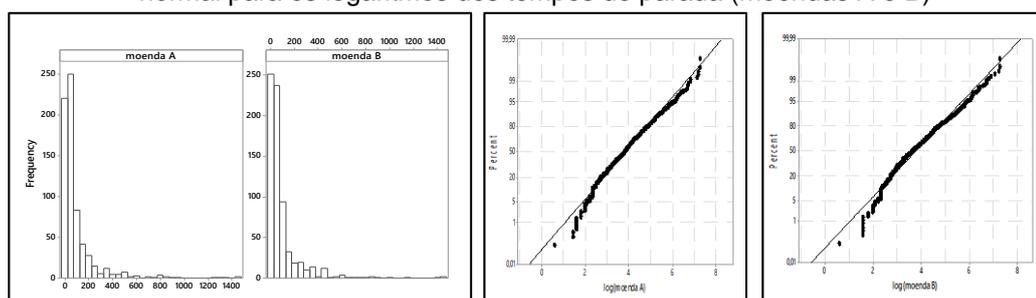
O período de safra ocorre de abril a novembro, quando a fábrica opera de forma contínua e semelhante a uma empresa de bens de consumo. A política de manutenção da empresa durante esse período envolve uma parada programada mensal de seis horas, a menos que ocorra chuva, o que inviabiliza o corte da cana. Nesse caso, a duração da parada é indefinida e pode se estender por vários dias,

dependendo das condições climáticas. O reinício das operações industriais só ocorre após a retomada das atividades agrícolas, que incluem o corte, o carregamento e o transporte da cana-de-açúcar para a indústria.

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

A Figura 2 mostra os histogramas dos tempos de parada (duração) em minutos na escala original para as duas moendas A e B. A Figura 2 também mostra os gráficos de probabilidade normal para os dados transformados para a escala logarítmica para as duas moendas, de onde observa-se bom ajuste da distribuição normal aos dados na escala logarítmica. Na Figura 2 observa-se grande assimetria dos histogramas para os dados de parada para as duas moendas o que leva a necessidade de ajustar alguma distribuição de probabilidade assimétrica aos dados como por exemplo, uma distribuição Weibull ou uma distribuição log-normal, duas distribuições de probabilidade muito usadas sob o enfoque de confiabilidade. A partir de uma transformação logarítmica dos tempos de parada observa-se boa normalidade para os dados transformados (pontos próximos da reta considerando um gráfico de probabilidade normal).

Figura 2 - Histogramas dos tempos de parada na escala original e gráficos de probabilidade normal para os logaritmos dos tempos de parada (moendas A e B)



Fonte Autor (2024).

3 MODELAGEM ESTATÍSTICA

Nesta seção apresenta-se algumas técnicas estatísticas para analisar os dados de paradas relacionados às duas moendas. Para isso, inicialmente são considerados modelos de ANOVA com uma classificação com os dados transformados para a

escala logarítmica para comparar as médias dos tempos de paradas nos diferentes níveis de cada fator assumido. Também são considerados modelos de confiabilidade para analisar os dados na escala original assumindo uma distribuição log-normal para os dados.

a. Modelos de ANOVA

Para uma primeira análise estatística dos tempos de parada da indústria de etanol assumindo os dados transformados em escala logarítmica, utiliza-se métodos de ANOVA (análise de variância) para comparar os dados de diferentes grupos ou fatores que afetam os tempos (duração) dos reparos. A análise de variância (ANOVA) é, de forma simplificada, uma coleção de modelos estatísticos nos quais a variância observada em uma variável de resposta é particionada em componentes atribuíveis a diferentes fontes de variação. Dessa forma, a ANOVA fornece um teste estatístico para saber se as médias de vários grupos são iguais ou não, ou seja, uma generalização dos testes t de Student para mais de dois grupos (Box *et al.*, 1978; ou Montgomery; Runger, 2010). Utilizando um modelo de ANOVA com apenas uma classificação, a hipótese nula estabelece que todos os grupos são simplesmente amostras aleatórias da mesma população. A rejeição da hipótese nula implica que diferentes tratamentos ou grupos têm médias diferentes. A análise estatística com um modelo de ANOVA assume independência, normalidade e homogeneidade das variâncias dos resíduos.

b. Modelo de análise de confiabilidade

Na análise de dados de falhas (confiabilidade) com os dados na escala original podemos usar modelos para análise de confiabilidade, onde existem dois tipos de modelos: modelos não paramétricos e modelos paramétricos. A utilização de métodos não paramétricos permite ter uma perspectiva sobre a natureza da distribuição dos dados a partir da qual foi desenhado sem, no entanto, selecionar uma distribuição específica. O uso de técnicas paramétricas tem sido mais frequente na área industrial do que na área médica (Lawless, 1982). Embora exista uma grande variedade de modelos probabilísticos utilizados na análise de sobrevivência, alguns modelos ganham posição de destaque, pois apresentam adequação comprovada em diversas

situações. Neste caso, tem-se os modelos exponencial, Weibull e o lognormal (Lawless, 1982; Lewis, 1994; Elsayed, 1996).

c. Distribuição log-normal

Uma variável aleatória T definida para valores positivos tem uma distribuição log-normal se o logaritmo de T , ou seja, $\ln(T)$ (logaritmo na base natural) é normalmente distribuído com média $\mu = E(\ln(T))$ e variância $\sigma^2 = \text{var}(\ln(T))$. A função densidade de probabilidade para T é dada por:

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

A média e a variância de T são dados respectivamente por,

$$\mu_T = \text{Média} = \exp(\mu + \sigma^2 / 2) \quad (2)$$

$$\text{Var}(t) = [\exp(\sigma^2 - 1)] \exp(2\mu + \sigma^2)$$

4 RESULTADOS

Nesta seção apresenta-se os resultados da análise dos dados de parada (manutenção) para as duas moendas usando as técnicas estatísticas introduzidas na seção 3 (modelos de ANOVA e modelos de confiabilidade). Assumindo modelos ANOVA considera-se os dados transformados para a escala logarítmica e a suposição de normalidade é verificada a partir de gráficos de resíduos dados pelo software Minitab®. Assumindo uma distribuição log-normal para os dados na escala original (sem transformação logarítmica) o ajuste do modelo é verificado a partir de gráficos da distribuição log-normal dados pelo software Minitab®. Isso será considerado em todas as aplicações a seguir.

a. Comparação dos tempos médios de parada para reparo das duas moendas

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

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

Variável	N	Media	D.P.	Variância	Mediana
moenda A	697	100,53	173,06	29949,74	45,00
moenda B	713	93,06	159,81	25538,23	37,80

Fonte: Autor (2024).

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

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

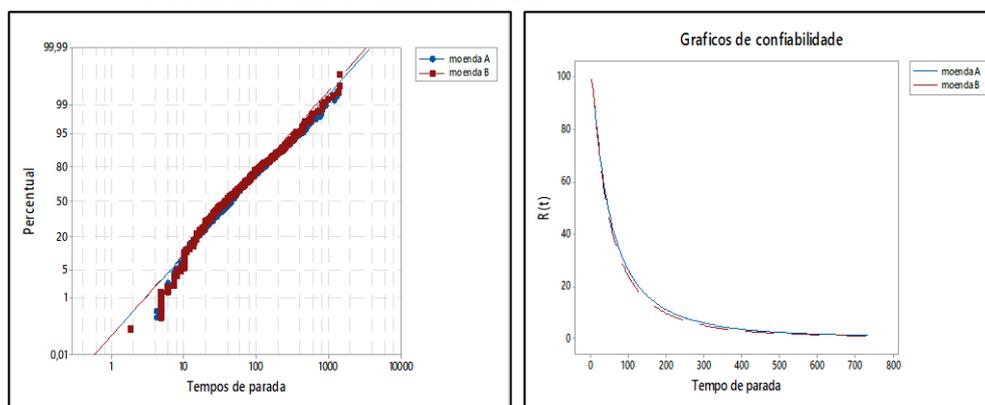
Tabela 2 - EMV para os parâmetros da distribuição log-normal (duas moendas)

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

Fonte: Autor (2024).

A Figura 3 mostra os gráficos de probabilidade log-normal associados com as duas moendas e os gráficos das funções de confiabilidade $R(t) = P(T > t)$, onde $P(.)$ denota probabilidade de um evento, para diferentes valores de t .

Figura 3 - Gráficos de probabilidade log-normal e gráficos das funções de confiabilidade $R(t)$ associados com as duas moendas



Fonte: Autor (2024).

Dos gráficos da Figura 3, observa-se bom ajuste dos dados de paradas para reparos com os dados das duas moendas para a distribuição log-normal (pontos próximos das retas no gráfico de probabilidade log-normal). Também observa-se que as funções de confiabilidade $R(t) = P(T > t)$ com diferentes valores para t são aproximadamente iguais para as duas moendas. Com esses resultados podemos concluir que as duas moendas são similares (medias de paradas iguais) e mesmo comportamento para as durações dos tempos de paradas.

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

b. Tempos de manutenção da Moenda A

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

(a) Causas

A Tabela 3 apresenta as estatísticas descritivas dos tempos de duração das paradas para reparos para cada nível do fator causa. Na análise estatística dos dados

assumimos os seguintes níveis para o fator causa que podem estar associados com as falhas: ELET (Manutenção Elétrica); EXCM (Excesso de capacidade de moagem - excesso de processamento); EXTR (Extração e moagem); FABR (Fábrica de açúcar); GVAP (Geração de Vapor); INST(Instrumentação) e MECN (Manutenção Mecânica).

Tabela 3 - Estatísticas descritivas associadas aos níveis do fator causa

Variável	Causa	N	Media	D.P.	Variância	Mediana
Duração (Min)	ELET	97	61,9	108,5	11763,1	28,2
	EXCM	23	142,3	205,8	42339,1	51,0
	EXTR	250	91,24	137,80	18988,05	41,40
	FABR	106	69,79	76,71	5885,13	49,80
	GVAP	53	119,1	150,3	22580,0	52,2
	INST	50	47,83	51,52	2653,99	30,00
	MECN	104	202,9	319,6	102155,8	74,4

Fonte: Autor (2024).

Dos resultados da Tabela 3, observa-se que o maior tempo médio de parada é dado para MECN (202,9). A partir de um modelo de ANOVA aplicado aos dados transformados ($\log(\text{duração})$), observa-se que as medias dos tempos de parada são estatisticamente diferentes (valor-p < 0,05). Como a hipótese de nulidade (medias iguais) foi rejeitada, usamos procedimentos usuais de comparações múltiplas dados pelo software Minitab® (método de Tukey ou método de Fisher) para construir intervalos de confiança 95% para as diferenças de medias encontrando as seguintes diferenças significativas: medias diferentes entre MECN e ELET, MECN e EXTR, MECN e FABR e MECN e INST (os intervalos de confiança 95% para as diferenças de medias não contém o valor zero).

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

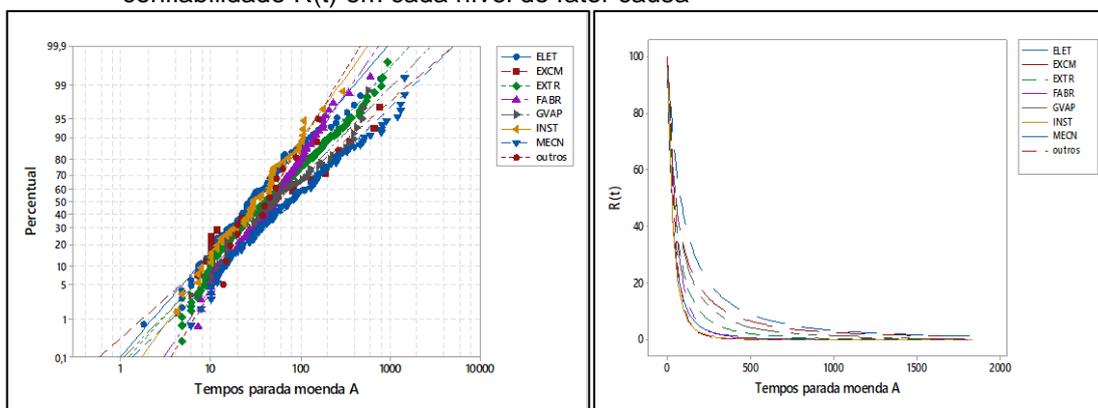
Tabela 4 - EMV para os parâmetros da distribuição log-normal (fator causa)

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

Fonte: Autor (2024).

A Figura 4 mostra os gráficos de probabilidade da distribuição log-normal associados com as duas moedas e os gráficos da função de confiabilidade $R(t)$. Observa-se que as probabilidades $R(t) = P(T > t)$ com diferentes valores para t são maiores para MECN, confirmando que os tempos de paradas são maiores com a causa MECN.

Figura 4 - Gráficos de probabilidade log-normal associados aos níveis do fator causa e gráficos de confiabilidade $R(t)$ em cada nível do fator causa



Fonte: Autor (2024).

(a) Turnos

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

Tabela 5 - Estatísticas descritivas associadas aos turnos

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

Fonte: Autor (2024).

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

(b) Meses

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

Tabela 6 - Estatísticas descritivas associadas aos meses

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

Fonte: Autor (2024).

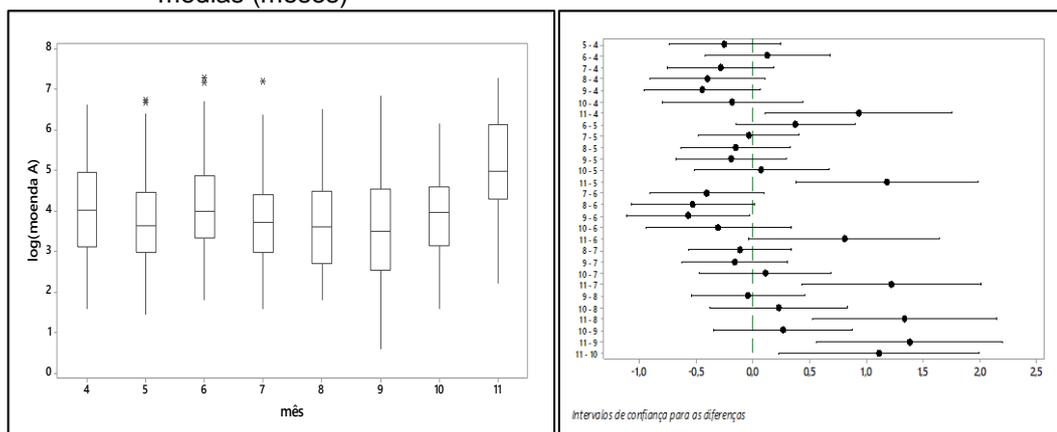
Dos resultados da Tabela 6, observa-se que o maior tempo médio de parada é dado para o mês 11 (novembro) com 295,9 minutos. Considerando os dados transformados (log(duração)), observa-se medias de paradas diferentes (ANOVA) entre meses (valor-p < 0,05). A partir de técnicas de comparações múltiplas de Tukey (e Fisher), observa-se médias diferentes entre os pares de meses, MÊS 11 - MÊS 4, MÊS 11 - MÊS 5, MÊS 9 – MÊS 6, MÊS 11 – MÊS 7, MÊS 11 – MÊS 8, MÊS 11 – MÊS 9 (ver Figura 5). Na Figura 5 também são dados os Box-plots para os dados de duração de reparos para os 8 meses.

Os EMV para as medias dos tempo de reparos μ_T (MTTR - Mean Time To Repair) para cada mês (4, 5, 6,...,10, 11), assumindo a distribuição log-normal (1) e considerando os dados na escala original são dadas, respectivamente, por: 108,8450(16,6910); 87,3927(12,5277); 125,7750(22,0818); 75,0837(8,41582);

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 24, n. 3, e-5028, 2024.

70,8191(10,0914); 79,9110(13,8066); 86,6941(17,0443) e 317,5410(112,3200). Isso confirma que o mês 11 (novembro) tem maior tempo médio de reparos com um erro-padrão muito grande (112,320). Também observa-se que as probabilidades $P(T > t)$ com diferentes valores para t é bem maior para o mês de novembro (11).

Figura 5 - Box-plots e intervalos de confiança 95% de Tukey para as diferenças de médias (meses)



Fonte: Autor (2024).

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

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

Tabela 7 - Estatísticas descritivas associadas aos níveis de grupo

Variável	Denominação	N	Media	D.P.	Variancia	Mediana
Duração em Min	Acionamento da moenda	52	153,6	281,1	78992,4	50,4
	Alimentação do sistema d	36	146,1	221,5	49060,6	55,5
	Armazenagem de açúcar	5	97,6	94,6	8956,9	64,2
	Embebição	39	57,2	74,6	5567,1	39,0
	Esteira Intermediária	44	35,02	36,51	1332,87	22,50
	Excesso Capacidade de Mo	3	198,0	270,0	72750,0	60,0
	Fabricação de açúcar	78	92,9	150,0	22513,3	48,0
	Falta de cana - transpor	1	52,800	*	*	52,800
	Geração de energia	20	108,8	111,9	12519,0	64,8
	Geração de vapor	41	93,1	116,1	13480,3	45,0
	Movimentação de bagaço	71	88,8	126,8	16084,5	33,0
	outro	1	25,200	*	*	25,200

Preparo de cana	135	138,3	246,5	60760,6	51,0
Rampa de Moagem	24	150,4	205,1	42061,1	53,4
Recepção de cana	15	40,7	64,6	4177,7	15,0
Terno de moenda	36	72,8	78,0	6080,9	41,4
Tratamento de caldo	91	70,71	86,06	7405,94	45,00
Utilidades	5	79,8	50,5	2547,5	82,2

Fonte: Autor (2024).

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

Variavel	Denominação	N	μ_T	Erro padrão
log(duração)	Acionamento da moenda	52	145,219	38,1994
	Alimentação do sistema ext	36	151,418	50,5705
	Armazenagem de açúcar	5	97,9767	42,8760
	Embebição	39	53,8245	7,7705
	Esteira Intermediária	44	34,0198	5,0327
	Excesso Capacidade de Moag	3	203,400	198,827
	Fabricação de açúcar	78	84,6704	12,3305
	Geração de energia	20	116,838	36,1803
	Geração de vapor	41	99,7801	25,3623
	Movimentação de bagaço	71	84,9759	15,8691
	Preparo de cana	135	126,561	17,9712
	Rampa de Moagem	24	173,748	76,3133
	Recepção de cana	15	37,5990	15,0610
	Terno de moenda	36	76,9053	17,8208
	Tratamento de caldo	91	71,4255	9,4350
	Utilidades	5	84,2562	31,5397

Fonte: Autor (2024).

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

c. Tempos de manutenção da Moenda B

(a) Causa

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

Tabela 9 - Estatísticas descritivas associadas aos níveis do fator causa

Variável	Causa	N	Media	D.P.	Variância	Mediana
Duração (Min)	AUT	5	72,0	56,2	3157,7	64,8
	ELET	83	63,2	101,3	10263,1	25,2
	EXCM	11	313,5	311,0	96699,3	255,0
	EXTR	319	98,4	198,2	39286,5	34,2
	FABR	68	89,9	111,5	12440,5	55,5
	GVAP	57	94,0	111,0	12324,2	40,2
	INST	61	42,88	52,67	2773,94	19,80
	MECN	96	114,2	118,0	13935,6	74,4
	outro	13	65,5	48,0	2304,8	67,8

Fonte: Autor (2023).

A Figura 6 mostra os Box-plots associados aos níveis do fator causa considerando os dados transformados para a escala logarítmica e intervalos de confiança 95% de Fisher para as diferenças de medias (causas) de onde pode-se descobrir as diferenças significativas entre medias (intervalos de confiança para as diferenças de medias que não contém o valor zero). A partir de um modelo de ANOVA aplicado aos dados transformados ($\log(\text{duração})$), observa-se que as medias dos tempos de parada são estatisticamente diferentes ($\text{valor-p} < 0,05$).

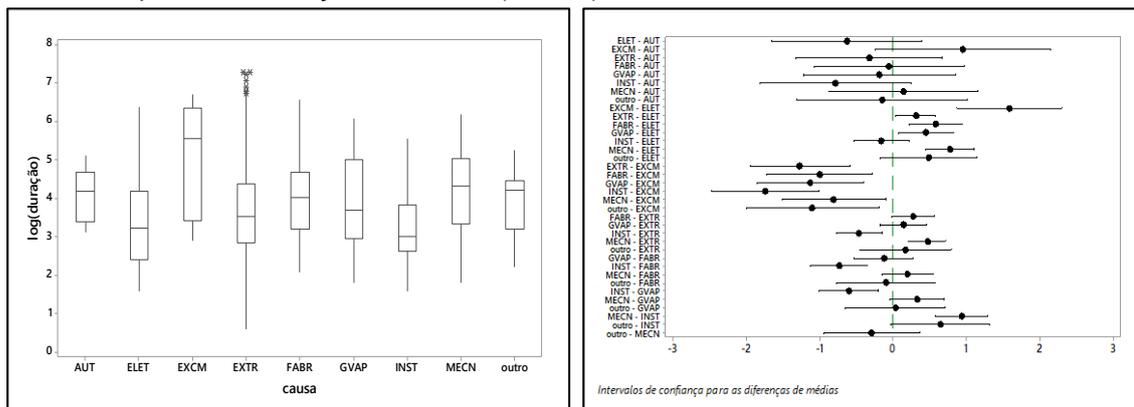
Assumindo um modelo de confiabilidade com a distribuição log-normal (1) para os dados na escala original, os estimadores de máxima verossimilhança para a média μ_T (MTTR - Mean Time To Repair) são dados na Tabela 10 para os vários níveis do fator causa. O maior tempo médio de reparo é confirmado para a causa EXCM.

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

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

Fonte: Autor (2024).

Figura 6 - Box-plots associados aos níveis do fator causa e intervalos de confiança 95% de Fisher para as diferenças de medias (causas)



Fonte: Autor (2024).

(b) Turnos

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

Tabela 11 - Estatísticas descritivas associadas aos turnos

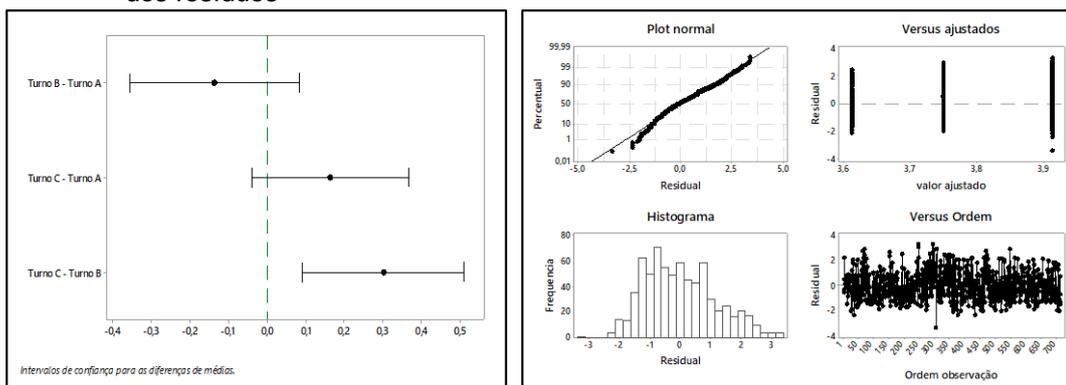
Variável	Turno	N	Media	D.P.	Variância	Mediana
Duração (Min)	Turno A	225	83,44	127,61	16283,63	39,00
	Turno B	206	67,72	84,05	7063,68	33,60
	Turno C	282	119,3	212,9	45341,4	42,0

Fonte: Autor (2024).

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

Considerando os dados transformados ($\log(\text{duração})$), observa-se que as medias dos tempos de parada (uso de um modelo de ANOVA) são estatisticamente diferentes entre turnos ($\text{valor-p} = 0,017 < 0,05$). Pelos gráficos de resíduos dados na Figura 7, observa-se que as suposições necessárias para ANOVA são verificadas. Observa-se medias diferentes para Turno C e Turno B pois o intervalo de confiança 95% para a diferenças de medias para os tempos de parada (Turno C – Turno B) não contém o valor zero (ver Figura 7).

Figura 7 - Intervalos de confiança 95% de Tukey para as diferenças de médias (turnos) e gráficos dos resíduos



Fonte: Autor (2024).

Os EMV para os tempos médios de reparos μ_T (MTTR - Mean Time To Repair) para cada turno assumindo a distribuição log-normal (1) e considerando os dados na escala original são dadas, respectivamente, por: 77,7993 (7,2243) para turno A; 66,6548 (6,3450) para turno B e 109,5870 (10,9138) para turno C. Isso confirma que o turno C tem maior tempo médio de reparos.

(c) Meses

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

Tabela 12 - Estatísticas descritivas associadas aos meses

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

Fonte: Autor (2024).

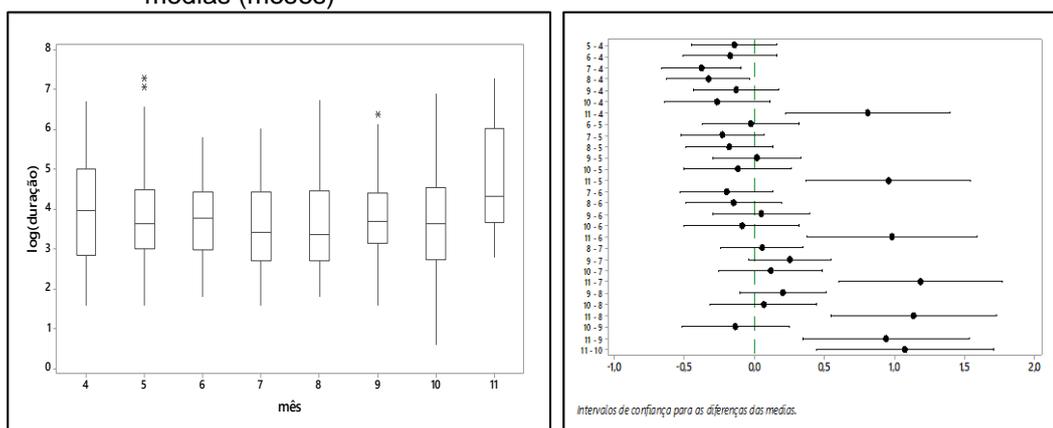
As medias dos tempos de parada (uso de um modelo de ANOVA com os dados transformados) são estatisticamente diferentes entre os meses (valor-p = 0,003 < 0,05). Observa-se medias diferentes entre os pares de meses, MÊS 11 - MÊS 4, MÊS 11 - MÊS 5, MÊS 11 - MÊS 6, MÊS 11 - MÊS 7, MÊS 11 - MÊS 8, MÊS 11 - MÊS 9,

MÊS 11 - MÊS 10, pois os intervalos de confiança 95% para as diferenças de medias não contém o valor zero (ver Figura 8). Na Figura 8 também são dados os Box-plots para os dados de duração de reparos para os 8 meses.

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

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

Figura 8 - Box-plots e intervalos de confiança 95% de Fisher para as diferenças de medias (meses)



Fonte: Autor (2024).

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

Dos resultados da Tabela 13 (estatísticas descritivas), observa-se que o maior tempo médio de parada para manutenção é dado para rampa de moagem com uma média de 259,7 minutos. Considerando os dados transformados (log(duração)), observa-se que as medias dos tempos de parada (uso de um modelo de ANOVA) são estatisticamente diferentes (valor-p < 0,05).

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

Tabela 13 - Estatísticas descritivas associadas aos níveis de grupo

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

Fonte: Autor (2024).

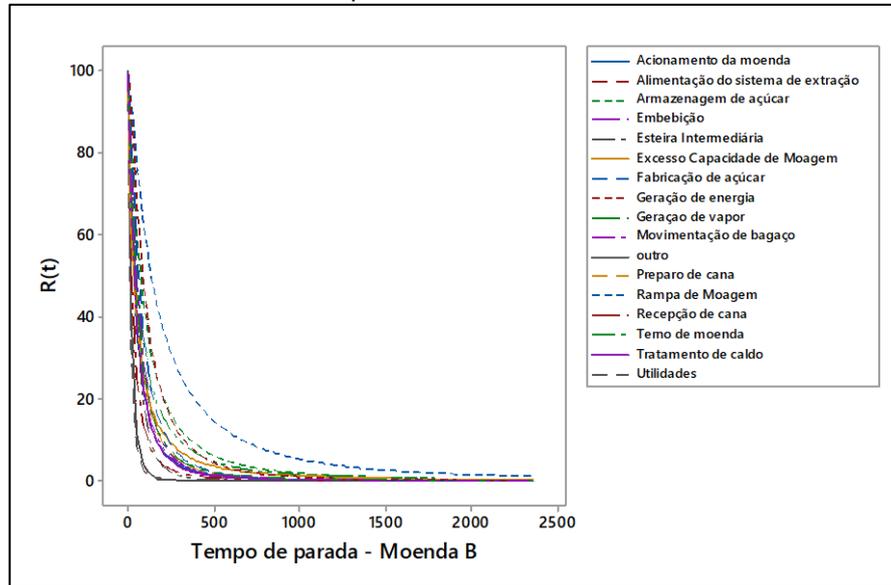
Tabela 14 - EMV para as médias dos tempos de reparos μ_T associadas aos níveis de grupo

Variável	Denominação	N	μ_T	Erro-padrão
log(duração)	Acionamento da moenda	64	75,4509	14,0716
	Alimentação do sistema ext	71	30,5930	3,3635
	Armazenagem de açúcar	4	161,131	129,918
	Embebição	58	90,6046	14,6191
	Esteira Intermediária	57	64,1906	8,3406
	Excesso Capacidade de Mo	17	104,956	52,5345
	Fabricação de açúcar	41	108,074	20,7952
	Geração de energia	18	149,310	43,4878
	Geração de vapor	34	90,9054	23,1675
	Movimentação de bagaço	64	80,4036	14,9935
	outros	3	29,9965	17,7817
	Preparo de cana	79	87,2606	14,3382
	Rampa de Moagem	29	292,383	86,8518
	Recepção de cana	43	52,0491	12,3814
	Terno de moenda	45	131,683	36,0101
	Tratamento de caldo	81	74,9259	11,5608
	Utilidades	5	24,9625	11,8666

Fonte: Autor (2024).

A Figura 9 mostra os gráficos das funções de confiabilidade $R(t)$.

Figura 9 - Probabilidades estimadas para $R(t) = P(T > t)$ com diferentes valores para t



Fonte: Autor (2023).

5 CONCLUSÃO E ALGUMAS CONSIDERAÇÕES

Conforme o objetivo inicial deste estudo, a estratégia de manutenção em uma usina de açúcar e álcool localizada no estado de São Paulo, Brasil, utilizando dados de MTTR de duas linhas de processamento de cana sob a perspectiva da engenharia de confiabilidade, resultou em conclusões de grande interesse para a indústria do setor. A análise estatística dos dados operacionais da usina estudada revela três resultados relevantes.

O Primeiro resultado, referente ao código da falha, revelou que a disciplina de Mecânica emerge como a principal causa de paradas, destacando-se significativamente quando comparada a outras áreas operacionais, tanto na Moenda A quanto na Moenda B. Porém, quando estratificamos as causas, é notável que, o "Excesso de capacidade de moagem" contribui significativamente para as duas Moendas. Neste caso, as recomendações da literatura, conforme destacado por Plantullo (1994), a economia de tempo em operações diferentes da operação gargalo é ilusória e indicam a necessidade de ajustes no ritmo de alimentação de cana para garantir que a moagem esteja alinhada com a capacidade da máquina, evitando

sobrecargas e interrupções não programadas. A otimização do processo de alimentação de cana é fundamental para reduzir a ocorrência desse problema específico.

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

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

Nesse contexto, fica evidente a necessidade de ações corretivas para melhorar o desempenho do turno C que possui maiores médias de paradas e melhorar a eficiência dos demais turnos, uma vez que estatisticamente, existem diferenças nas médias. Uma abordagem eficaz para esse problema é a implementação de treinamentos dedicados em manutenção e operação (Pinto, 2009). Uma ferramenta sugerida para esse caso, introduzida por Wireman (1990) em um livro de sua autoria “O TPM - Total Productive Maintenance”, traduzido no Brasil como “Manutenção Produtiva Total”, seria um programa onde todos desenvolvem atividades de melhoria contínua nos equipamentos e processos. A maximização da eficiência dos

equipamentos e processos é obtida através de pequenos grupos de trabalho e implementação de atividades de manutenção autônoma”. Tu *et al.* (2001) considera a Manutenção Produtiva Total como um capacitador análogo à Manufatura Enxuta. Este capacitador evita que máquinas e processos não confiáveis levem a aumentos nos tempos de produção e consequentes atrasos nos prazos dos clientes. Dessa forma, investir em capacitação técnica pode resultar em uma redução significativa nas paradas não programadas e melhorias gerais na eficiência operacional.

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

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

A Manutenção Preditiva é um enfoque que se baseia no estado atual do equipamento. Esse método envolve a coleta e análise de dados contínuos para supervisionar e monitorar o desempenho do ativo, conforme mencionado por Goulart *et al.* (2016). A manutenção preditiva permite prever o momento ideal para a intervenção, garantindo que a manutenção seja realizada apenas quando necessário. O principal benefício dessa abordagem otimizada é que ela evita interrupções não planejadas, maximizando o tempo de operação eficiente do equipamento. Cerveira e Sellitto (2015) também ressaltam que a manutenção preditiva leva em consideração as condições reais do equipamento, evitando intervenções com base em suposições e permitindo que o ativo funcione por um período prolongado.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria uma abordagem focada ao problema encontrado no mês de novembro, fruto deste trabalho.

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

REFERÊNCIAS

ABED, K.; MUTLAG, S. **Using AHP Methods in Maintenance to Improve Reliability and Equipment Performance**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020,978. 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/978/1/012008>.

AFEFY, I. **Reliability-Centered Maintenance Methodology and Application: A Case Study**. *Engineering*, 2010 02. <https://doi.org/10.4236/eng.2010.211109>.

ALSYOUF, I. Maintenance practices in Swedish industries: Survey results. *International Journal of Production Economics*, v. 121, n. 1, p. 212-223, 2009. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:278723/FULLTEXT01.pdf>

BALASO, F.; JAGTAP, H. **Failure analysis steam turbine in sugar factory thermal power plant: a Review**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024. 1285. 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1285/1/012005>.

BUCKERIDGE, M. S.; GRANDIS, A.; TAVARES, E. Q. P. **Disassembling the Glycomic Code of Sugarcane Cell Walls to Improve Second-Generation Bioethanol Production**. [s.l.] Elsevier Inc., 2019.

CERVEIRA, D. S.; SELLITTO, M. A. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise quantitativa de um forno elétrico a indução. *Revista Produção Online*, v. 15, n. 2, p. 405-432, 2015. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v15i2.1615>

DZULYADAIN, H.; BUDIASHIH, E.; DWI ATMAJI, F. **Proposed maintenance policy using reliability centered maintenance (RCM) method with FMECA analysis: A**

case study of automotive industry. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021.1034.012111.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1034/1/012111>.

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

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

<https://doi.org/10.1108/02635570210423226>

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

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

GANDHARE, B.S., AKARTE, M.M., PATIL, P.P. Maintenance performance measurement: a case of the sugar industry, **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 24, n. 1, p. 79-100, 2018. <https://doi.org/10.1108/JQME-07-2016-0031>

GOULART, N.H.B.; LIMA, S.C.; SOUZA, D.S.V.F.; RAPOSO, J.F.P. **Proposta de implantação de um sistema de manutenção preventiva em uma empresa de pequeno porte do ramo de fabricação de fraldas.** ENEGEP – ABEPRO. Maceió, 2016.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção função estratégica.** Rio de Janeiro, Qualitymark, 2015.

KHAMIS, B. ; HIREN, S.. **Use of Reliability Centered Maintenance (RCM) Analysis in Petroleum Development Oman (PDO) for Maintenance Rationalization**, 2000. <https://doi.org/10.2118/87249-MS>.

KOMNINAKIS, D. **Análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia.** 2017, 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) UNIARA, Araraquara, 2017.

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

<https://doi.org/10.14488/1676-1901.v18i2.2871>

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

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

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

LIMA, T. M. **Estudo energético do bagaço de diferentes variedades de cana-de-açúcar**. 2011, 73 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, 2011.

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

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

MOHAMMED, A.; GHAITHAN, A.; AL-SALEH, M.; AL-OFI, K. Reliability-Based Preventive Maintenance Strategy of Truck Unloading Systems. **Applied Sciences**, <https://doi.org/10.6957, 2020. 10.3390/app10196957>.

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

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

MORENO, C. R. C.; FISCHER, F. M. ; Rotenberg, L. A Saúde do Trabalhador na Sociedade 24 Horas. São Paulo em Perspectiva, v.17, n. 1, p. 34 - 46, 2003. <https://www.scielo.br/j/spp/a/QBknckVzpzpKN33rZpTYDYhM/?format=pdf&lang=pt>

MUNOZCEVALLOS, J.; MACIAS, M. Mantenimiento centrado en la confiabilidad a equipos en industria de conservas de atún. **Científica**, v.25, p. 1-12, 2022. <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v25n2a05>.

PLANTULLO, V. L. Um Pouco Além do Just-in-Time: Uma Abordagem à Teoria das Restrições. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v. 34, n. 5, p. 32-39.1994.

<https://www.scielo.br/j/rae/a/fGKh4BMDhh5LgkmYvLqhkJi/?format=pdf&lang=pt>

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

RAPOSO, C. F. C. Overall Equipment Effectiveness: aplicação em uma empresa do setor de bebidas do polo industrial de Manaus. **Revista Produção Online**, v. 11, n. 3, p. 648-667, 2011. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v11i3.529>

RAUSAND, M. Reliability centered maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 60, n. 2, p. 121-132, 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320\(98\)83005-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320(98)83005-6)

RUSCHEL, E.; SANTOS, E. A. P.; LOURES, E. F. R. Industrial maintenance decision-making: A systematic literature review. **Journal of Manufacturing Systems**, v.45, p.180-194, 2017. <https://isiarticles.com/bundles/Article/pre/pdf/108287.pdf>

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do Potencial de Geração de Energia Elétrica para Diferentes Fontes de Biogás no Brasil. **Renabi, Biomassa & Energia**, v.2, n.1, p. 57-67, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>

SELLITTO, M. A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Production**, v. 15, n. 1, p. 44-59, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132005000100005>

SHARMA, R.; BHATTRAJ, N. Reliability Based Maintenance in Hydropower: A Case Study of Bijaypur-I Small Hydropower Plant. **Journal of Innovations in Engineering Education**, v. 3., p.123-130, 2020. <https://doi.org/10.3126/jiee.v3i1.34333>.

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

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

TU, Q; VONDEREMBSE, M.A.; RAGU-NATHAN, T.S.: The impact of time-based manufacturing practices on mass customization and value to customer. **Journal of Operations Management**, vol.19, p. 201-217, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(00\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00056-5)

UNICA, União da Indústria de Cana-de-Açúcar (2023). **Safra 2021/2022 processa 523 milhões de toneladas de cana**. <https://unica.com.br/noticias/safra-2021-2022-processa-523-milhoes-de-toneladas-de-cana/>. Acesso em: 02/09/2023.

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

VISHNU, C. R.; REGIKUMAR, V. Reliability based maintenance strategy selection in process plants: a case study. **Procedia Technology**, v. 25, p. 1080-1087, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.211>

WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L. CIBOCOF: a framework for industrial maintenance concept development. **International Journal of Production Economics**, v. 121, n. 2, p. 633-640, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.10.012>

ZENG, S. Discussion on maintenance strategy, policy and corresponding maintenance systems in manufacturing. **Reliability Engineering & System Safety**. v.55, p. 151-162, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(96\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(96)00004-X).

AUTORES

Timóteo Simão Ferreira

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG-2009). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação de processos, atuando principalmente nos seguintes temas: Automação, Manutenção Elétrica e Instrumentação. Possui certificação Six Sigma - Green Belt (2012). Também possui Pós-graduação *Lato Senso* em Automação de processos industriais pela Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP (2015) e é mestrando em engenharia de produção pela Universidade de Araraquara, UNIARA. Possui interesse em melhorias de processos industriais com foco em gestão da produção.

Jorge Alberto Achcar

Possui graduação em matemática pela UNESP em 1971, mestrado em estatística pelo IME-USP, São Paulo em 1976, doutorado (PhD) em estatística pela Universidade de Wisconsin-Madison, Estados Unidos em 1982. Professor livre-docente pelo ICMC-USP em 1990. Possui pós-doutorado pelas Universidades de Nottingham, Inglaterra; de Connecticut, EUA e Carnegie-Mellon, EUA. Professor visitante em diversas universidades brasileiras e estrangeiras. Atualmente atua como professor colaborador no departamento de medicina social da faculdade de medicina da USP, campus de Ribeirão Preto. Possui interesse em Gestão Estratégica e Organizacional (Métodos Quantitativos e Estatística Aplicada à Engenharia de Produção).



Artigo recebido em: 08/10/2023 e aceito para publicação em: 11/07/2024
DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v24i3.5028>