

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**CONFIABILIDADE ESTATÍSTICA COMO FERRAMENTA DE APOIO À
MELHORIA DO *OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS* (OEE) EM
FABRICAÇÃO: O CASO DA MANUTENÇÃO DE BOMBAS
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

ALISSON PINHEIRO

RIO GRANDE, RS

2023

ALISSON PINHEIRO

**CONFIABILIDADE ESTATÍSTICA COMO FERRAMENTA DE APOIO À
MELHORIA DO *OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS* (OEE) EM
FABRICAÇÃO: O CASO DA MANUTENÇÃO DE BOMBAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Simulação e controle de processos de fabricação

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Gomes

RIO GRANDE, RS

2023

Ficha Catalográfica

P654c Pinheiro, Alisson.

Confiabilidade estatística como ferramenta de apoio à melhoria do *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) em fabricação: o caso da manutenção de bombas / Alisson Pinheiro. – 2023.
99 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2023.

Orientador: Dr. Leonardo Gomes.

1. Fabricação 2. Confiabilidade 3. Estratégia de manutenção
4. Bombas 5. OEE I. Gomes, Leonardo II. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº **2/2023** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dez dias do mês de março de dois mil e vinte e três, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quatorze horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **ALISSON PINHEIRO**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Simulação e controle de processos de fabricação, com o seguinte título: **CONFIABILIDADE ESTATÍSTICA COMO FERRAMENTA DE APOIO À MELHORIA DO OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE) EM FABRICAÇÃO: O CASO DA MANUTENÇÃO DE BOMBAS**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Leonardo De Carvalho Gomes, Luciano Volcanoglo Biehl, Lidiana Zocche e Fernando Henrique Lermen sob a presidência do Professor Leonardo De Carvalho Gomes. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Leonardo de Carvalho Gomes: APROVADO
2. Luciano Volcanoglo Biehl: APROVADO
3. Lidiana Zocche: APROVADO
4. Fernando Henrique Lermen: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:  Documento assinado digitalmente
LEONARDO DE CARVALHO GOMES
Data: 13/03/2023 16:37:59-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

1. _____
CPF: 885.669.350-04

 Documento assinado digitalmente
LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL
Data: 13/03/2023 17:38:50-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

2. _____
CPF: 575.195.100-00

 Documento assinado digitalmente
LIDIANA ZOCCHÉ
Data: 14/03/2023 13:48:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

3. _____
CPF: 056.752.419-14

 Documento assinado digitalmente
FERNANDO HENRIQUE LERMEN
Data: 14/03/2023 10:11:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

4. _____
CPF: 090.244.619-36

 Documento assinado digitalmente
ALISSON PINHEIRO
Data: 13/03/2023 17:10:46-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Alisson Pinheiro: _____

À minha família, meu porto seguro.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e meu orientador Leonardo de Carvalho Gomes pelo conhecimento adquirido, paciência e dedicação na jornada do mestrado.

Ao amigo Fernando Toigo pelo apoio e flexibilidade da jornada de trabalho, que tornou possível o desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores membros da banca examinadora Luciano Volcanoglo Biehl, Lidiana Zocche e Fernando Henrique Lermen pela disponibilidade e contribuição para realização desta dissertação.

Aos colegas Paulo Renato Pinheiro e Lauro Orseli pela parceria e ajuda sempre que se fez necessário.

À FURG pela qualidade do ensino e dedicação total no desenvolvimento acadêmico e profissional dos alunos.

À minha esposa Gabriela, pelo suporte, incentivo e compreensão pelo tempo dedicado ao mestrado. Às minhas irmãs Alice e Alinne, minha admiração e orgulho. À minha mãe Clecira, por todo o amor, educação e força na nossa criação.

RESUMO

Para prevenir a ocorrência de falhas inesperadas e melhorar a disponibilidade das máquinas, a gestão estratégica de manutenção busca identificar as melhores técnicas e metodologias que podem ser utilizadas para aumentar a confiabilidade dos ativos. O presente trabalho introduz os conceitos da confiabilidade estatística ao determinar a estratégia de manutenção em bombas. A importância do uso desta ferramenta também é associada à melhoria do *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), amplamente utilizado nos diversos segmentos da indústria de manufatura. Em seguida, são mostradas algumas formas de modelagem matemática de tempos até a falha destes equipamentos e é então apresentado o modelo de Weibull. Conhecido por sua versatilidade em estudos de confiabilidade, a modelagem por Weibull é capaz de identificar falhas prematuras e por desgaste. Este trabalho analisa a confiabilidade estatística a partir da bibliografia renomada e de artigos da atualidade. O estudo é realizado em um ambiente de fabricação real, onde são utilizadas duas bombas de idêntica especificação instaladas em máquinas distintas e diferentes estratégias de manutenção são adotadas. Os desafios ao determinar a melhor estratégia baseada no histórico de falhas são apresentados, com atenção especial à influência dos resultados no indicador de eficiência global, destacando a disponibilidade, que garante a operação contínua da instalação industrial. Para solucionar os problemas causados pelo elevado número de falhas dos equipamentos, utiliza-se das funções de confiabilidade para análise de um período de dois anos. Os dados obtidos a partir do sistema de planejamento de recursos empresariais (ERP) da indústria foram utilizados no software de modelagem e os resultados mostram que, além da melhoria da confiabilidade, é possível aumentar em até 84,25% o tempo médio até a falha (MTTF) da bomba com utilização desta ferramenta. Desta forma, pode-se influenciar positivamente a disponibilidade da máquina e gerar melhores resultados para a manutenção com maior controle de gerenciamento destes ativos.

Palavras-chave: Fabricação. Confiabilidade. Estratégia de manutenção. Bombas. OEE.

ABSTRACT

To prevent unexpected failures and improve machine availability, strategic maintenance management seeks to identify the best techniques and methodologies that can be used to increase asset reliability. This paper introduces the concepts of statistical reliability when determining the maintenance strategy for pumps. The importance of using this tool is also associated with the improvement of Overall Equipment Effectiveness (OEE), widely used in many segments of the manufacturing industry. Some forms of mathematical modeling of time-to-failure of this equipment are shown and then the Weibull model is presented. Known for its versatility in reliability studies, Weibull modeling is capable of identifying premature and wear failures. This paper analyzes the statistical reliability from the reputed literature and current articles. The study is carried out in a real manufacturing environment, where two pumps of identical specification but installed in different machines and different maintenance strategies are used. The challenges to determine the best strategy based on the history of failures are presented, with special attention to the influence of the results on the global efficiency indicator, highlighting the availability, which guarantees the continuous operation of the industrial installation. To solve problems caused by the high number of equipment failures, reliability functions are used to analyze a two-year period. The data obtained from the industry's Enterprise Resource Planning (ERP) system were used in a modeling software and the results show that, in addition to improving reliability, it is possible to increase the Mean Time to Failure (MTTF) of the pump by up to 84.25% using this tool. In this way, it can positively influence machine availability and generate better results for maintenance with greater management and control of assets.

Keywords: Manufacturing. Reliability. Maintenance strategy. Pumps. OEE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de OEE e as seis grandes perdas.	20
Figura 2: Curva da banheira.....	26
Figura 3: Prensa utilizada para revestimento de chapas de MDF.....	32
Figura 4: Típica instalação de sistemas de óleo térmico em prensas para revestir chapas de MDF.	32
Figura 5: Instalação real de uma bomba de óleo térmico em uma prensa.	33
Figura 6: Delimitação do estudo à bomba.	34
Figura 7: Ambiente de trabalho do <i>ProConf</i> ® na tela principal, com a janela de entrada de dados ativada.	36
Figura 8: Fluxograma para o desenvolvimento do trabalho.	38
Figura 9: Tempo entre falhas, em horas, das bombas 1 e 2 – ano 2021.	43
Figura 10: Histograma dos tempos até a falha das bombas 1 e 2 – ano 2021.	44
Figura 11: Papel da probabilidade - Weibull bombas 1 e 2 – ano 2021.	46
Figura 12: Função $h(t)$ das bombas 1 e 2 em 2021.....	46
Figura 13: Função $R(t)$ das bombas 1 e 2 em 2021.....	47
Figura 14: Posição das bombas 1 e 2 na curva da banheira ano 2021.....	49
Figura 15: Tempo entre falhas, em horas, das bombas 1 e 2 – ano 2022.	50
Figura 16: Histograma dos tempos até a falha das bombas 1 e 2 – ano 2022.	51
Figura 17: Papel da probabilidade - Weibull bombas 1 e 2 – ano 2022.	52
Figura 18: Função $h(t)$ das bombas 1 e 2 em 2022.....	53
Figura 19: Função $R(t)$ das bombas 1 e 2 em 2022.	53
Figura 20: Posição das bombas 1 e 2 na curva da banheira ano 2022.....	54
Figura 21: Identificação da falha de lubrificação em rolamento da bomba-1.	58
Figura 22: Manutenção corretiva e lubrificação da bomba-1.....	59
Figura 23: Comparação função $R(t)$ da bomba-1 anos 2021 e 2022.	61
Figura 24: Comparação função $R(t)$ da bomba-2 anos 2021 e 2022.	62
Figura 25: Posição das bombas 1 e 2 na curva da banheira anos 2021 e 2022.....	63
Figura 26: Comparação OEE prensa-1 anos 2021 e 2022.	64
Figura 27: Comparação OEE prensa-2 anos 2021 e 2022.	65
Figura 28: Comparação da disponibilidade prensa 1 anos 2021 e 2022.....	65
Figura 29: Comparação da disponibilidade prensa 2 anos 2021 e 2022.....	66

Figura 30: Comparação da performance prensa 1 anos 2021 e 2022.	67
Figura 31: Comparação da performance prensa 2 anos 2021 e 2022.	67
Figura 32: Comparação da qualidade prensa 1 anos 2021 e 2022.....	68
Figura 33: Comparação da qualidade prensa 2 anos 2021 e 2022.....	68
Figura 34: Indisponibilidade da bomba - Prensa 1 anos 2021 e 2022.....	69
Figura 35: Indisponibilidade da bomba - Prensa 2 anos 2021 e 2022.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fase da vida do equipamento e estratégia de manutenção.	30
Tabela 2: OEE Prensa-1 ano de 2021.	42
Tabela 3: OEE Prensa-2 ano de 2021.	42
Tabela 4: Parâmetros de ajuste do tempo entre falhas para as bombas 1 e 2 ano 2021.	45
Tabela 5: Estratégia de manutenção adotada para bombas em função da confiabilidade.	48
Tabela 6: Parâmetros de ajuste do tempo entre falhas para as bombas 1 e 2 ano 2022.	52
Tabela 7: OEE Prensa-1 ano de 2022.	55
Tabela 8: OEE Prensa-2 ano de 2022.	55
Tabela 9: Principais defeitos encontrados na bomba-1.....	56
Tabela 10: Principais defeitos encontrados na bomba-2.....	57
Tabela 11: Comparação dos parâmetros de ajuste do tempo entre falhas para as bombas 1 e 2 anos 2021 e 2022 – Modelo de Weibull.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS

ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i> (Planejamento de Recursos Empresariais)
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> (Painel de Fibras de Média Densidade)
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i> (Tempo Médio de Falha)
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i> (Tempo Médio para Reparo)
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i> (Eficiência Global do Equipamento)
TTF	<i>Time to Failure</i> (Tempo até a Falha)

LISTA DE SÍMBOLOS

Nomenclatura

$R(t)$	Função confiabilidade
$h(t)$	Função risco
$f(t)$	Função densidade de probabilidade de falha
$F(t)$	Função densidade acumulada de falha entre um período de tempo t_1 e t_2
$A(t)$	Função disponibilidade
t	Tempo (h)
t_1	Tempo inicial (h)
t_2	Tempo final (h)
t_{10}	Tempo característico para uma confiabilidade de 90% (h)
t_{50}	Tempo característico para uma confiabilidade de 50% (h)

Símbolos gregos

γ	Fator de forma (-)
θ	Fator de escala (-)
Δt	Variação de tempo (h)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos.....	17
1.2 Objetivo geral.....	17
1.3 Objetivos específicos.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 <i>Overall Equipment Effectiveness (OEE)</i>	19
2.2 Confiabilidade estatística.....	22
2.3 Distribuição de tempos até a falha.....	24
2.3.1 Exponencial.....	24
2.3.2 Weibull.....	25
2.3.3 Gamma.....	26
2.3.4 Lognormal.....	26
2.4 Estratégia de manutenção	27
2.4.1 Emergencial.....	28
2.4.2 Corretiva.....	28
2.4.3 Preventiva.....	29
2.4.4 Preditiva.....	29
2.5 Confiabilidade e estratégia de manutenção	30
3. METODOLOGIA	31
3.1 Caracterização da pesquisa	31
3.1.1 Caracterização do objeto de estudo.....	31
3.1.2 Ambiente, estrutura e softwares.....	35
3.2 Etapas da pesquisa	37
4. RESULTADOS	41
4.1 Resultados de 2021	41
4.1.1 OEE.....	41
4.1.2 TTF – Tempo até a Falha.....	43
4.1.3 Funções de confiabilidade.....	44
4.2 Resultados de 2022 com o uso da confiabilidade estatística	49
4.2.1 TTF – Tempo até a Falha.....	50
4.2.2 Funções de confiabilidade.....	51

4.2.3 OEE	55
4.2.4 Principais falhas encontradas	56
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	60
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
7. CONCLUSÕES.....	73
8. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	75
9. REFERÊNCIAS	77
9.1 Referências Nominais.....	77
9.2 Referências por Estrato.....	80
9.3 Referências por Qualis	81
9.4 Referências por Data dos Artigos	81
ANEXOS	82
APÊNDICE.....	84

1. INTRODUÇÃO

A estratégia de manutenção, definida por Abbas e Shafiee (2020) como a política que rege as decisões gerenciais do processo de manutenção e que determina quais ferramentas, técnicas e metodologias serão utilizadas, pode gerar impactos significativos na disponibilidade e confiabilidade operacional dos ativos. Wudhikarn (2016) destaca que, com a alta competitividade do mercado, as empresas buscam ser cada vez mais eficientes em seus processos. Nesse contexto, o OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) torna-se uma ferramenta crucial e a mais disseminada para medir o desempenho das operações das indústrias de manufatura. A origem do indicador OEE, desenvolvido por Nakajima (1988), está no conceito das perdas, dividido em seis categorias que reduzem a eficiência dos equipamentos. Ainda, segundo Nakajima (1988), ao medir-se o OEE é revelado o grau no qual o processo de manufatura é verdadeiramente produtivo, servindo como um indicador geral e inclusivo da performance das operações de fabricação de uma empresa. O resultado encontrado mostra se a organização está em uma condição aceitável, mas, se estiver abaixo do nível aceito mundialmente, pode significar que a estratégia de manutenção precisa de melhorias. Neste contexto, a manutenção passou por aperfeiçoamentos ao longo dos anos e por muitas mudanças quando comparada a outros setores em nível gerencial. Essas mudanças deram-se a partir do aumento do número de ativos nas empresas, do desenvolvimento de novas tecnologias, do surgimento de novas técnicas de manutenção e a partir de estudos realizados na área de confiabilidade (CHIKWENDU, 2020).

A manutenção com base na condição é uma estratégia que se disseminou com o passar dos anos, tornando-se bastante utilizada pelas equipes de manutenção. Contudo, essa estratégia nem sempre proporciona os resultados esperados de eficiência global. Apesar do gestor de manutenção ter à disposição modernas tecnologias que auxiliam na gestão dos ativos e na tomada de decisão, o que se observa é uma ausência de ferramentas e análises quantitativas que ajudem a determinar a melhor estratégia a ser adotada. Isto ocorre devido a elaboração destas estratégias de manutenção serem baseadas apenas na experiência de técnicos e na recomendação de fabricantes dos equipamentos (GOOSSENS, 2015).

Segundo Souza *et al.* (2020), o conhecimento sobre a confiabilidade dos equipamentos é um aspecto essencial para as decisões assertivas nas companhias. Com importância estratégica, a confiabilidade de equipamentos e sistemas atraiu a atenção de pesquisadores, com primeiro periódico publicado sobre o tema em 1963 na revista *IEEE Journal*. Leemis (1995) definiu que a confiabilidade de um item corresponde a probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas. Selvik (2011) demonstra que, ao adotar uma estratégia sem conhecer a confiabilidade do equipamento, pode-se não eliminar todas as falhas inesperadas. Isto ocorre devido esta metodologia não levar em consideração o “estado de saúde” atual de todos os componentes, podendo resultar em tempos de inatividade desnecessários, custos excessivos de reparo e falhas induzidas por manutenção. Nos estudos desenvolvidos por Macchi *et al.* (2012) e Selitto (2017), foram identificadas as fases da vida do equipamento e as estratégias de manutenção recomendadas para aumentar sua confiabilidade, sem elevar os gastos em manutenção. Assim, a confiabilidade estatística vem se mostrando uma ferramenta de apoio que pode elevar a disponibilidade e melhorar o OEE.

Sendo o OEE um indicador amplamente utilizado nas indústrias de manufatura, esta métrica é utilizada, pelo presente autor, para avaliar o grau de sucesso no uso da confiabilidade estatística. A proposta do presente trabalho caracteriza-se pela implementação da confiabilidade estatística, a qual produz análises que possam se tornar a parte quantitativa do processo de decisão da melhor estratégia a ser adotada em bombas para a melhoria do OEE de um processo de fabricação. Com potencial de aplicação em fábricas modernas, onde altos níveis de qualidade e eficiência são requisitados, a avaliação destes equipamentos críticos, que desempenham um papel importante na indústria de painéis de fibra de média densidade, chamadas de MDF (*medium density fiberboard*), mostra-se como uma oportunidade para a realização de um estudo de caso. Esta proposta busca atingir resultados de disponibilidade superiores e também estabelecer uma condição de operação mais estável através da redução das falhas recorrentes.

Este trabalho está estruturado inicialmente para posicionar o leitor no contexto da manutenção, das suas vantagens e dos desafios ao utilizar a confiabilidade estatística nesta área do meio industrial. No capítulo 2, faz-se uma revisão dos

principais conceitos das estratégias de manutenção, da teoria da confiabilidade estatística e de sua relação com o indicador de eficiência global OEE. O próximo abordado é a metodologia, encontrada no capítulo 3. Nesta etapa, é apresentada a organização da pesquisa, sua caracterização e a estrutura utilizada para condução do estudo em um ambiente industrial real. Para seu desenvolvimento, utilizam-se dados de produção, de manutenção e de tempos de falha das bombas, que são equipamentos encontrados em fábricas que produzem chapas revestidas de MDF. Com isso, busca-se tornar a análise replicável em equipamentos similares encontrados no segmento. Neste mesmo capítulo, o fluxograma de trabalho é apresentado, seguido pela explicação das atividades desenvolvidas. Os resultados obtidos são demonstrados no capítulo 4, seguido da análise e discussões. As considerações finais estabelecem se estes resultados são satisfatórios ou não e, finalmente, determinam sua utilização na manutenção de ativos como uma ferramenta de apoio para melhoria do OEE. A seguir, são apresentados os objetivos.

1.1 Objetivos

Este subcapítulo apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

1.2 Objetivo geral

Aplicar a confiabilidade estatística para adotar estratégias de manutenção em equipamentos, visando o aumento de confiabilidade e melhoria do OEE.

1.3 Objetivos específicos

A partir da determinação da confiabilidade de equipamentos e da importância deste tipo de análise, não somente em um único segmento, mas em todos os tipos de indústria e do vasto campo de aplicação e problemas de indisponibilidade, que podem

ser evitados a partir da aplicação destes métodos, são objetivos específicos deste trabalho:

- a) Obter o entendimento da equipe responsável pela manutenção dos equipamentos sobre o uso da confiabilidade estatística;
- b) Encontrar a fase da vida dos equipamentos analisados, antes e após a realização do estudo;
- c) Realizar os cálculos de confiabilidade e determinar se a utilização das diferentes estratégias de manutenção pode reduzir falhas recorrentes e aumentar o MTTF (*Mean Time to Failure*);
- d) Discutir os resultados e comparar com a pesquisa teórica realizada para verificar o quanto a confiabilidade estatística ajuda na melhoria do OEE.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

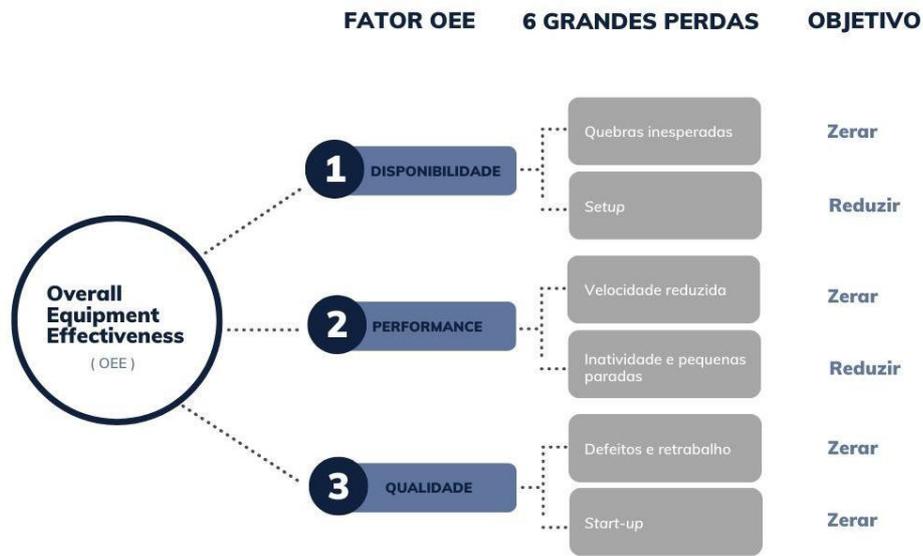
Neste capítulo são apresentados conceitos e pesquisas de autores que estudaram os temas OEE, confiabilidade estatística e estratégias de manutenção. Pelo fato de ter sido encontrado pouco material disponível que relacione estes temas, esta pesquisa pode influenciar uma série de futuros trabalhos e o desenvolvimento de ferramentas de confiabilidade nesta área que pode possuir um extenso campo de aplicação.

2.1 *Overall Equipment Effectiveness (OEE)*

Para serem competitivas, as indústrias devem promover uma excelente confiabilidade e qualidade em seus equipamentos com produtos a preços atraentes. O *Overall Equipment Effectiveness (OEE)* é uma métrica utilizada para medir a eficiência de um equipamento em sistemas industriais (TSAROUHAS, 2019). Segundo Wudhikarn (2016), o OEE é uma ferramenta crucial e a mais disseminada para medir o desempenho de indústrias de manufatura.

Foi Nakajima (1988) que elencou em seis categorias principais as perdas que reduzem a eficiência dos equipamentos. Um modelo adaptado de Chikwendu (2020) é mostrado na Figura 1. Neste modelo, as seis grandes perdas são apresentadas e cada uma delas está relacionada a um dos fatores que compõe o cálculo do OEE.

Figura 1: Modelo de OEE e as seis grandes perdas.



Fonte: adaptado de Chikwendu (2020).

Chikwendu (2020) demonstra o cálculo do OEE e cita que este indicador é obtido através da multiplicação da disponibilidade, performance e da qualidade dos produtos, conforme apresentado na Eq. (2.1).

$$OEE = (Disponibilidade \times Performance \times Qualidade) \times 100 \quad (2.1)$$

em que:

$$Disponibilidade = \frac{\text{tempo operacional}}{\text{tempo programado}} \quad (2.2)$$

Conforme mostrado na Eq. (2.2), o *tempo operacional* é o tempo em que a máquina ou sistema esteve disponível para produzir por dia, mês, ou mesmo pelo número de operações, já descontadas as perdas por falhas, setup e ajustes. Já o *tempo programado* é o tempo total planejado para produzir.

A performance, mostrada na Eq. (2.3), calcula a razão entre a *produção realizada* e a *produção programada*, sendo o numerador o total produzido no dia ou mês e denominador o total programado para o mesmo período.

$$Performance = \frac{\textit{produção realizada}}{\textit{produção programada}} \quad (2.3)$$

Já a qualidade ou taxa de qualidade, conforme mencionado por alguns autores é apresentada na Eq. (2.4).

$$Qualidade = \frac{\textit{produção aceitável}}{\textit{total produzido}} \quad (2.4)$$

Na Eq. (2.4), a *produção aceitável*, refere-se à quantidade aprovada, descontada a produção rejeitada e o *total produzido* é a soma destas parcelas.

O OEE ainda pode ser definido como a métrica da performance de operações de produção e produtividade, o qual é expresso em percentual, conforme mostrado na Eq. (2.1), e indica o grau no qual o processo de manufatura é verdadeiramente produtivo, servindo como uma medida geral e inclusiva do desempenho das operações de fabricação de uma empresa (CHIKWENDU, 2020).

Ainda, Chikwendu (2020) apresenta dados globais de OEE e menciona que o *benchmark* aceito mundialmente é de 85%, sendo que a disponibilidade, a performance e a qualidade deverão ser maiores que 90, 95 e 99 por cento, respectivamente. Se o percentual calculado é igual ou maior ao *benchmark*, interpreta-se que a organização está em boa condição. Mas, se o OEE está abaixo de 85% pode significar que a política de manutenção e estratégia precisam de melhorias. Caso contrário, será difícil sustentá-la.

2.2 Confiabilidade estatística

Incontáveis esforços têm sido feitos no campo da confiabilidade desde 1970 para avaliar equipamentos e sistemas, bem como para atender aos requisitos para os quais foram projetados (BURDICK, 1977).

O conceito de confiabilidade foi introduzido na gestão da manutenção por meio de um trabalho seminal sobre falhas em equipamentos eletrônicos de uso militar nos anos 1950. As conclusões reorientaram procedimentos de manutenção até então vigentes: (i). Se um item não possui modo predominante e característico de falha, revisões programadas afetam muito a confiabilidade do item; e (ii). Para muitos itens a prática de manutenção não é eficaz (MOUBRAY, 1996).

De acordo com Leemis (1995), a confiabilidade de um item corresponde a probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas. E, segundo Elsayed (1996), a confiabilidade $R(t)$ é a probabilidade que um produto ou serviço opere adequadamente e sem falhas sob as condições de projeto, durante um tempo especificado, na vida do projeto. A função confiabilidade varia de 0 a 1 e pode ser utilizada como uma medida parcial de sucesso de um projeto industrial.

Ireson *et al.* (1996) citam que há três funções e um parâmetro considerados importantes em estudos relacionados à confiabilidade. São eles: a função densidade de probabilidade de falha $f(t)$, a função confiabilidade $R(t)$, a função risco $h(t)$, e o tempo médio até a falha MTTF (*Mean Time to Failure*).

A função densidade de probabilidade de falha $f(t)$, que representa a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo é apresentada na Eq. (2.5):

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.5)$$

$F(t)$ é a função acumulada entre um período de tempo t_1 e t_2 , representada pela Eq. (2.6).

$$F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt \quad (2.6)$$

A função confiabilidade $R(t)$, que calcula a probabilidade de que um componente não falhe em um determinado período é apresentada na Eq. (2.7).

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - \int_{-\infty}^t f(t)dt = 1 - F(t) \quad (2.7)$$

Sobre a função risco $h(t)$ podemos afirmar que:

A função de risco $h(t)$ pode ser considerada a medida de confiabilidade mais difundida na prática. Tal função pode ser interpretada como a quantidade de risco associada a uma unidade no tempo t . A função de risco é bastante útil na análise do risco a que uma unidade está exposta ao longo do tempo, servindo como base de comparação entre unidades com características distintas. A função de risco é também conhecida em confiabilidade como taxa de falha ou taxa de risco. (FOGLIATTO E RIBEIRO, 2011, p. 10)

A função risco, que é a taxa de falha instantânea no intervalo $(t, t + \Delta t)$ é apresentada na Eq. (2.8).

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (2.8)$$

Tendo acesso aos dados contendo as falhas de um item, o tempo médio até a falha MTTF (do inglês *mean time to failure*) pode ser obtido pela função distribuição acumulada, apresentada na Eq. (2.6) (ZAKIKHANI, 2020).

Já a disponibilidade de um item $A(t)$, que é um dos principais indicadores de confiabilidade utilizados em gestão de manutenção e mede a eficiência das ações de manutenção corretiva, representa a probabilidade de um equipamento estar operante quando necessitado e pode ser aproximada a partir da Eq. (2.9).

$$A(t) \approx \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}, t \geq 0 \quad (2.9)$$

A Eq. (2.9) mostra que pode-se utilizar o tempo médio até a falha MTTF e o tempo médio de reparo MTTR (do inglês *mean time to repair*) para calcular a disponibilidade $A(t)$ na grande maioria dos casos. Essa dependência é demonstrada em Rausand e Hoyland (2004) e Fogliatto e Ribeiro (2011). Ainda pode-se obter o resultado da disponibilidade através da Eq. (2.2).

2.3 Distribuição de tempos até a falha

Para Fogliatto e Ribeiro (2011), a determinação da função confiabilidade é possível pela modelagem, por uma distribuição de probabilidade, dos tempos até a falha do objeto de estudo. A modelagem oferece outras informações importantes, tais como probabilidade de sobrevivência até o tempo t , o tempo médio até a falha e a função risco $h(t)$ do equipamento. Ainda segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), as distribuições mais utilizadas para demonstrar as falhas em equipamentos são a exponencial, Weibull, gamma e lognormal. Segundo os autores, a distribuição normal é pouco aplicada a estudos relacionados à confiabilidade.

2.3.1 Exponencial

A distribuição exponencial segundo Diallo *et al.* (2001) é frequentemente utilizada em análises de confiabilidade de máquinas. Para o autor o modelo exponencial é fácil de compreender, implementar e a literatura tem demonstrado que ele fornece boas aproximações para distribuições de falha de máquinas.

Para Fogliatto e Ribeiro (2011), a distribuição exponencial é importante em estudos de confiabilidade por ser a única distribuição contínua com função de risco constante. Propriedades importantes desta distribuição diz respeito à ausência de memória de unidades com tempos de falha modelados pela exponencial; isto é, supõe-se unidades com mesma confiabilidade $R(t)$, para qualquer t , independente de sua idade ou tempo de uso. Tal suposição restringe sua aplicação a alguns componentes elétricos.

Segundo Ireson *et al.* (1996) como a distribuição exponencial tem a limitação prática de representar o comportamento de confiabilidade de máquinas antigas, recorreremos ao modelo Weibull. Este modelo pode ser utilizado para uma taxa de falha crescente. A distribuição Weibull é uma distribuição versátil que é esperado para atender a muitos padrões de falha diferentes.

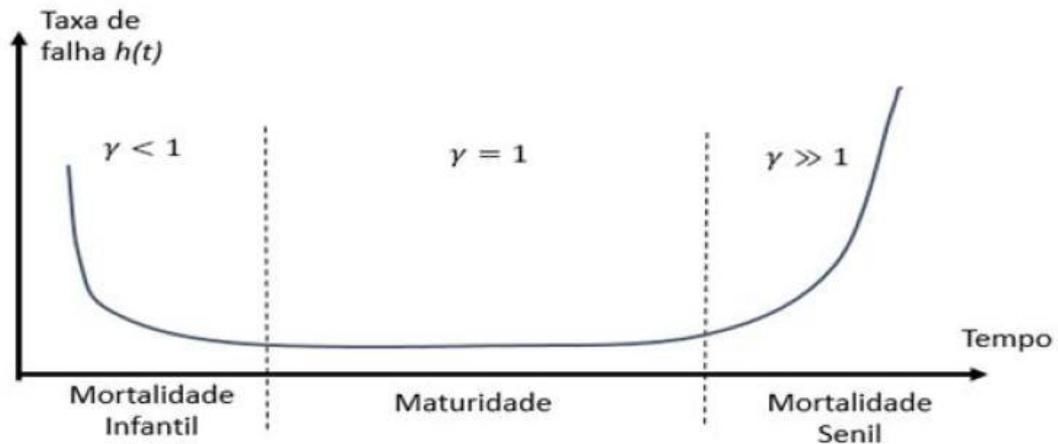
2.3.2 Weibull

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2011), a distribuição de Weibull costuma ser um bom ponto de partida para amostras de tempo até falha de tamanho pequeno. Essa distribuição explica o comportamento de sistemas cuja falha “nasce” da competição entre diversos modos de falha. A primeira que acontecer, ocorre a falha, como nos equipamentos industriais.

No campo da confiabilidade estatística, a análise e distribuição de Weibull para equipamentos traz a possibilidade de identificar se a falha ocorre de forma prematura, aleatória ou por desgaste. Isso pode ser identificado através da plotagem da função risco $h(t)$ e pela análise do seu formato, também conhecida como “curva da banheira” (SELLITTO, 2017).

Uma construção genérica da curva da banheira é apresentada na Figura 2 e representa as três fases da vida de componentes: quando $h(t)$ é decrescente ocorre a mortalidade infantil e indica falhas prematuras, $h(t)$ constante indica uma fase de maturidade com falhas aleatórias, enquanto $h(t)$ crescente indica que as falhas ocorrem por desgaste na fase de mortalidade senil ou envelhecimento. Cada fase da curva está relacionada a um comportamento de $h(t)$ e ao valor do fator de forma γ da distribuição de Weibull.

Figura 2: Curva da banheira.



Fonte: Adaptado de Mengue e Sellitto (2013).

A Figura 2 mostra que o fator de forma $\gamma < 1$ representa a fase de mortalidade infantil, $\gamma = 1$ representa a fase de maturidade e $\gamma > 1$ representa a fase de mortalidade senil ou envelhecimento.

2.3.3 Gamma

A distribuição Gamma descreve sistemas que operam em paralelo. O tempo para a falha de um sistema que opera com componentes em paralelo, constituído por n componentes independentes tal como bombas ou compressores, é o tempo total até que o último componente venha a falhar (DODSON e NOLAN, 2002).

2.3.4 Lognormal

A distribuição lognormal é comumente usada para análise de confiabilidade geral, de ciclos até a falha em fadiga, de resistência do material e de variáveis de carregamento em projetos probabilísticos (ELSAYED, 1996).

A distribuição lognormal também está relacionada ao tempo de reparo, com a literatura destacando que:

A lognormal é uma distribuição limitada à esquerda, muito utilizada na modelagem de tempos até reparo em unidades reparáveis. Assim, é razoável supor que a probabilidade de completar uma ação de reparo aumenta com o passar do tempo. Caso o reparo demorar muito a ser concluído, há uma série de indicativos de causas especiais sobre o processo. Assim, costuma-se supor que a taxa de reparo, isto é, a intensidade com que os reparos são concluídos se assemelhe à função risco de uma distribuição lognormal. A função de risco da lognormal apresenta o formato de uma curva da banheira invertida, com $h(t)$ crescendo inicialmente e, após, decrescendo assintoticamente. (FOGLIATTO E RIBEIRO, 2011, p. 32).

2.4 Estratégia de manutenção

A estratégia de manutenção pode ser definida como a política que rege as decisões gerenciais do processo de manutenção e que define quais ferramentas, técnicas e metodologias serão utilizadas. O objetivo da gestão estratégica da manutenção é focalizar apenas as ações que têm mais chance de trazer bom resultado com baixo esforço (SELLITTO, 2017). Para M. Abbas (2020) e M. Shafiee (2020), melhorar a eficiência e a efetividade do gerenciamento estratégico da manutenção pode ter significativo impacto na disponibilidade e confiabilidade operacional de ativos.

Pham (1996) e Wang (1996) citam que uma importante área de pesquisa em engenharia da confiabilidade é o estudo das políticas de manutenção para prevenir a ocorrência de falhas em sistemas e melhorar a disponibilidade. E para Fraser *et al.* (2015), o gerenciamento da manutenção mudou do patamar de “um mal necessário” para se tornar estrategicamente importante para as mais competitivas organizações do mundo.

Para as empresas melhorarem suas estratégias de manutenção e empregarem melhorias contínuas nos sistemas de manufatura, uma comparação entre o OEE desejado e medido pode promover o impulso necessário (WANG, 2006). Porém, apesar da manutenção preventiva baseada em revisões periódicas ser o método mais

aplicado e utilizado, essas técnicas têm se tornado cada vez mais improdutivas e com uma abordagem de baixa confiabilidade (GAO, 2015). Tal modo de gerenciamento é menos eficiente e mais caro, devido ao tempo de indisponibilidade e possíveis danos aos equipamentos (BIANCHINI, 2019). Também em alguns casos, há a necessidade de um estoque elevado de peças de reposição, em que talvez não fosse necessário, além de aumentar os custos para a empresa (KIANGALA, 2018).

A manutenção com base na condição se disseminou com o passar dos anos, tornando-se uma estratégia bastante utilizada pelas equipes de manutenção. Contudo, essa estratégia nem sempre entrega o resultado de OEE esperado. Uma estratégia que tem sido usada, sem elevar gastos em manutenção, é a de aumentar a confiabilidade e a manutenibilidade de equipamentos, e por consequência a disponibilidade (SELLITTO, 2017).

Os subcapítulos a seguir apresentam quatro estratégias de manutenção utilizadas na indústria em que o estudo foi realizado e suas respectivas definições e aplicabilidade.

2.4.1 Emergencial

Também conhecida como manutenção reativa ou *run-to-failure* em inglês, a manutenção emergencial é a estratégia de manutenção em que uma recuperação parcial ou total do sistema é realizada apenas após uma falha ter sido detectada (GEORGIEV, 2020). A manutenção emergencial não é programada e pode gerar uma falha funcional do ativo, resultando na parada do equipamento. A emergência também ocorre quando detectados riscos operacionais relacionados à segurança ou meio ambiente, e que podem afetar a qualidade do produto. Esta estratégia é tipicamente apenas recomendada quando as consequências da falha são relativamente baixas (MATTHEWS, 2016).

2.4.2 Corretiva

Na manutenção corretiva, uma correção no equipamento é necessária para trazê-lo de volta ao seu estado normal de funcionamento após uma parada não programada. Essa ação envolve o reparo ou a substituição de componentes defeituosos, e pode ser realizada de forma programada ou quando necessário. Apesar desta estratégia de manutenção ser, preferencialmente, aplicada naqueles equipamentos onde a consequência da falha e também o investimento necessário são pequenos comparados a qualquer outra estratégia de manutenção, a manutenção corretiva pode trazer custos adicionais de reparo e indisponibilidade quando aplicada a um equipamento crítico (HOUSHYAR, 2005).

2.4.3 Preventiva

A manutenção preventiva é a manutenção baseada em intervalos, a qual é aplicada para prevenir qualquer falha potencial ou degradação severa que possa impactar na confiabilidade do sistema em um futuro próximo. A frequência da manutenção preventiva é, normalmente, baseada na experiência de técnicos e na recomendação de fabricantes dos equipamentos (GOOSSENS, 2015).

Apesar dos vários benefícios intrínsecos, a manutenção preventiva não elimina todas as falhas inesperadas, pois não leva em consideração o “estado de saúde” atual de todos os componentes. Por esse motivo, a manutenção preventiva, às vezes, resulta em tempos de inatividade desnecessários, em custos excessivos de reparo e em falhas induzidas por manutenção (SELVIK, 2011).

2.4.4 Preditiva

Em Abbas (2020), a manutenção preditiva ou manutenção baseada na condição é descrita como o uso de modernos métodos para diagnosticar precisamente as falhas e prever a condição futura de operação do equipamento. De acordo com essa estratégia, a manutenção é executada quando um ou mais indicadores mostram que o desempenho do equipamento está diminuindo ou que o mesmo está prestes a falhar. Pesquisadores mostraram que a estratégia de manutenção preditiva é mais eficiente que a estratégia de manutenção preventiva. A literatura mostra que o

uso de técnicas preditivas pode estender os ciclos de revisão de manutenção em até 50% e economizar de 25 a 45% dos custos de manutenção.

2.5 Confiabilidade e estratégia de manutenção

Com a identificação da distribuição probabilística que melhor se adapta aos tempos até a falha dos equipamentos, pode-se plotar a função risco $h(t)$ e verificar o fator de forma γ da função. A partir dessa ideia, Macchi *et al.* (2012) e Selitto (2017) orientam que diferentes estratégias de manutenção são recomendadas para cada fase da vida na qual se encontra o equipamento. A Tabela 1 apresenta a relação da fase da vida com a melhor estratégia.

Tabela 1: Fase da vida do equipamento e estratégia de manutenção.

Fases	Estratégia	Decorrencia
mortalidade infantil, falhas prematuras	Corretiva	antecipa o fim da mortalidade infantil ao reforçar os itens que quebraram ou remover as causas das falhas de origem
maturidade, falhas aleatórias	Preditiva	informa o início e monitora os processos de falhas progressivas que resultarão em quebras, podendo prever aumentos na probabilidade da quebra
desgaste / envelhecimento falhas progressivas	Preventiva	previne a emergência antecipando a troca à quebra que realmente vai ocorrer, porém a um custo interno mais alto do que a emergência

Fonte: Adaptado de Selitto (2017).

O capítulo a seguir apresenta a metodologia utilizada na presente pesquisa relacionada à confiabilidade estatística na manutenção de equipamentos. Ao longo da metodologia é demonstrado como utilizar, de forma quantitativa, a melhor estratégia de manutenção a ser empregada no objeto do estudo de caso escolhido.

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada e está dividido em dois subcapítulos: caracterização da pesquisa e etapas da pesquisa.

3.1 Caracterização da pesquisa

A estratégia adotada nesta pesquisa foi a de se realizar um estudo de caso aplicado com abordagem qualitativa e quantitativa. Enquanto a abordagem qualitativa buscou determinar o contexto e as características do objeto e ambiente no qual ele está inserido, a utilização de técnicas e métodos quantitativos foi necessário para se determinar qual a estratégia de manutenção a ser empregada nos equipamentos e avaliar se os resultados obtidos foram satisfatórios ou não.

O estudo de caso foi caracterizado por possuir uma entidade definida, sendo a empresa analisada a entidade eleita por possuir a disponibilidade de recursos e equipamentos necessários para a realização dos testes na linha de produção. Além disso, foi disponibilizado acesso ao histórico de falhas dos equipamentos superiores a um ano, capazes de produzir uma amostragem suficiente para representar a fase da vida dos equipamentos analisados.

Por fim, este estudo é caracterizado como de natureza aplicada, pois busca gerar conhecimento a partir da aplicação prática da confiabilidade estatística, dirigido à solução de problemas práticos da indústria, no caso como a melhoria da confiabilidade e OEE.

3.1.1 Caracterização do objeto de estudo

Sistemas de óleo térmico são utilizados para transferência de calor. Em uma prensa, estes sistemas podem servir como meio para obter temperaturas elevadas, ideais para revestir chapas de MDF. O princípio de funcionamento consiste no aquecimento dos pratos através da circulação de óleo em trocadores de calor com

serpentinadas inseridas dentro dos pratos. A temperatura é mantida por meio de uma válvula de três vias que admite óleo quente automaticamente à medida que a temperatura decresce. A Figura 3 apresenta uma prensa de revestir chapas de MDF.

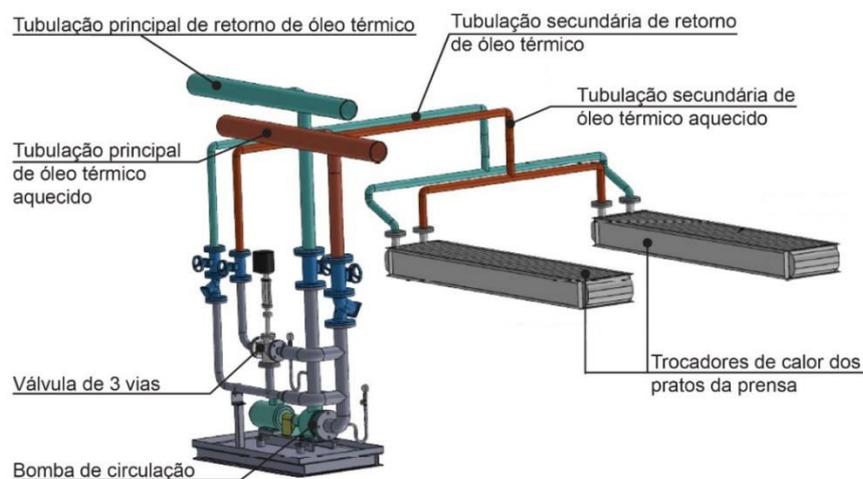
Figura 3: Prensa utilizada para revestimento de chapas de MDF.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4 apresenta um típico sistema de circulação de óleo térmico destas prensas.

Figura 4: Típica instalação de sistemas de óleo térmico em prensas para revestir chapas de MDF.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na Figura 4, a bomba faz o óleo térmico circular entre os trocadores inseridos no prato da prensa, cedendo calor para o processo e mantendo-os aquecidos durante os ciclos de prensagem. Já a válvula de três vias, admite óleo quente a cerca de 250°C à medida que a temperatura decresce. A Figura 5 mostra uma instalação real de uma bomba de óleo térmico que faz parte do sistema de aquecimento de uma prensa.

Figura 5: Instalação real de uma bomba de óleo térmico em uma prensa.



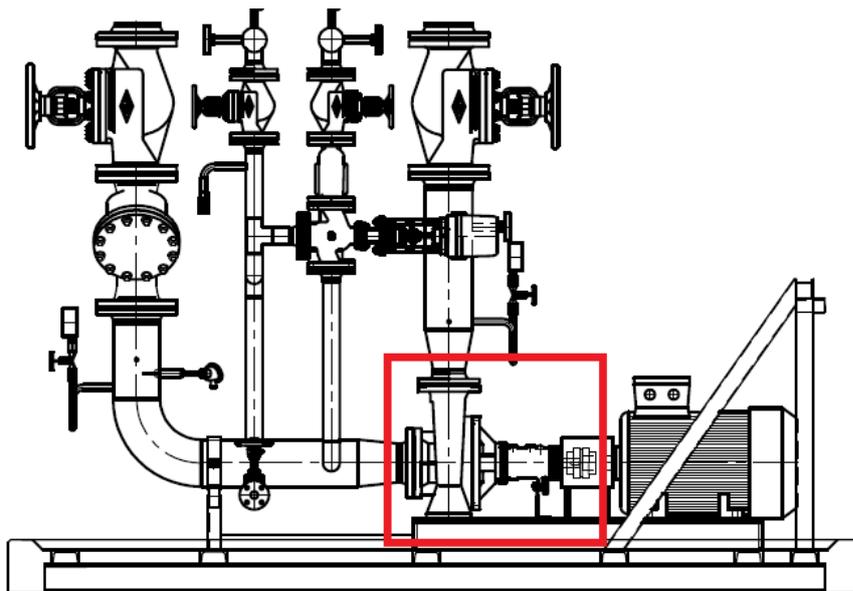
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4 e Figura 5 apresentaram o sistema de aquecimento de uma prensa, demonstrando a importância e a criticidade das bombas para o processo produtivo. Nesta etapa de fabricação, a temperatura desempenha um papel importante e a parada emergencial da bomba torna a máquina inoperante. Sendo assim, a ocorrência de falhas constantes e inesperadas nestes equipamentos causam perdas de produção, redução no OEE e podem oferecer riscos à própria instalação. Como a confiabilidade estatística busca identificar falhas recorrentes de sistemas críticos e então tratá-las através do emprego de técnicas de manutenção adequadas, isso justifica a escolhas das bombas como objeto de estudo principal neste trabalho.

Os sistemas de aquecimento são equipamentos robustos e foram projetados para resistir à altas temperaturas as quais estão expostos em regime de operação contínua. Apesar disso, verificou-se, no entanto, que esses sistemas possuem um elevado histórico de falhas, sendo as bombas o motivo de diversas paradas e perdas de produção.

Com o objetivo de delimitar o estudo apenas às bombas, foi elaborado um desenho esquemático apresentado na Figura 6 em que é destacada a bomba de circulação do óleo térmico. Neste equipamento foi realizado o levantamento e análise de tempos até a falha.

Figura 6: Delimitação do estudo à bomba.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A especificação técnica das bombas analisadas neste estudo e apresentadas na Figura 6 são idênticas, com potência de acionamento de 50 *hp*, fabricação alemã, construídas com corpo em ferro fundido GS-C 25 e vazão de projeto de 220 m^3/h . Em um experimento real, no qual o equipamento opera no regime contínuo de 24 horas por dia, a atenção no registro das falhas tornou-se fundamental para o desenvolvimento do trabalho. Neste sentido, foi importante a revisão e controle do histórico de falhas ao longo da fase de levantamento e coleta de dados.

As bombas de circulação de óleo térmico estão sujeitas ao desgaste. Neste caso, o modelo de distribuição de Weibull demonstra o comportamento de um sistema em que diversos modos de falha competem entre si, onde o primeiro a ocorrer resulta na falha do equipamento. Além disto, o modelo de distribuição de Weibull costuma ser um bom ponto de partida para amostras de tempo até falha de tamanho pequeno, conforme apresentado no capítulo 2.3.2. Assim como Weibull, as distribuições: exponencial, gamma e lognormal também são testadas e a adesão das mesmas verificada.

É por meio da relação apresentada na Tabela 1 que é possível observar-se a utilização da confiabilidade estatística em bombas, sendo possível identificar a fase da vida do equipamento, adotar a estratégia de manutenção mais adequada, acompanhar o aumento da confiabilidade e verificar o OEE de um sistema complexo como o das prensas. A seguir é apresentado o ambiente, estrutura e softwares necessários para o desenvolvimento do trabalho.

3.1.2 Ambiente, estrutura e softwares

O estudo de caso foi realizado em uma indústria localizada na região metropolitana de Porto Alegre – Rio Grande do Sul. A companhia produz chapas de MDF para o setor moveleiro e com atuação no mercado desde 2002, quando a iniciou suas operações. O quadro geral de colaboradores é de aproximadamente 500 trabalhadores e conta com um departamento de engenharia de manutenção composto por: um especialista, seis analistas e dois supervisores. Esta equipe é responsável pelo controle, planejamento e melhorias de manutenção.

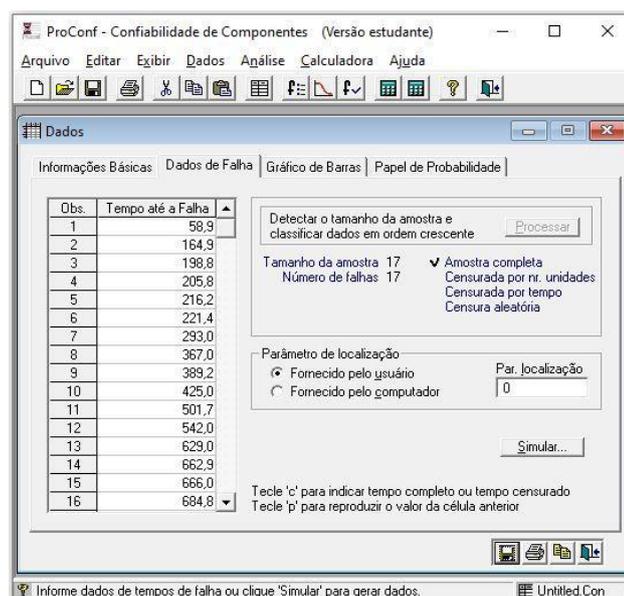
A utilização da confiabilidade estatística como ferramenta de apoio na manutenção é recente e por vezes desconhecida pelas empresas. Em geral, esse tipo de estudo requer investimento inicial com pessoas qualificadas e sistemas para controle e análise dos dados de falhas. Contudo, sistemas cada vez mais acessíveis estão disponíveis no mercado. Para o presente estudo foi utilizada a estrutura física da empresa, um analista e um supervisor do departamento de engenharia de manutenção, com o pesquisador desenvolvendo uma observação sistemática,

também conhecida como observação passiva. Neste sentido, antes de executar a observação sistemática foi necessário elaborar o plano de execução, que será apresentado em forma de fluxograma no subcapítulo 3.2.

Além de estrutura física e de pessoas, também é necessário um software que sirva como ferramenta para medir e analisar os dados de falha. Neste estudo foi utilizado o software *ProConf@*, desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e fornecido aos estudantes da disciplina de Engenharia da Confiabilidade do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PPMec) da Universidade Federal do Rio Grande – FURG.

O *ProConf@* é utilizado para realizar os cálculos estatísticos relacionados à confiabilidade, conforme apresentado nas Eq. (2.5), Eq. (2.6), Eq. (2.7) e Eq. (2.8). Este software ajusta as distribuições de tempos até a falha (TTF – *Time to Failure*) para dados de confiabilidade por meio de métodos analíticos e gráficos. O *ProConf@*, por sua vez, incorpora os principais modelos matemáticos encontrados na literatura, que representam os tempos até a falha, conforme apresentado no capítulo 2.3. A Figura 7 mostra o ambiente de trabalho do *ProConf@* na tela principal, com a janela de entrada de dados ativada.

Figura 7: Ambiente de trabalho do *ProConf@* na tela principal, com a janela de entrada de dados ativada.



Fonte: Software *ProConf@*.

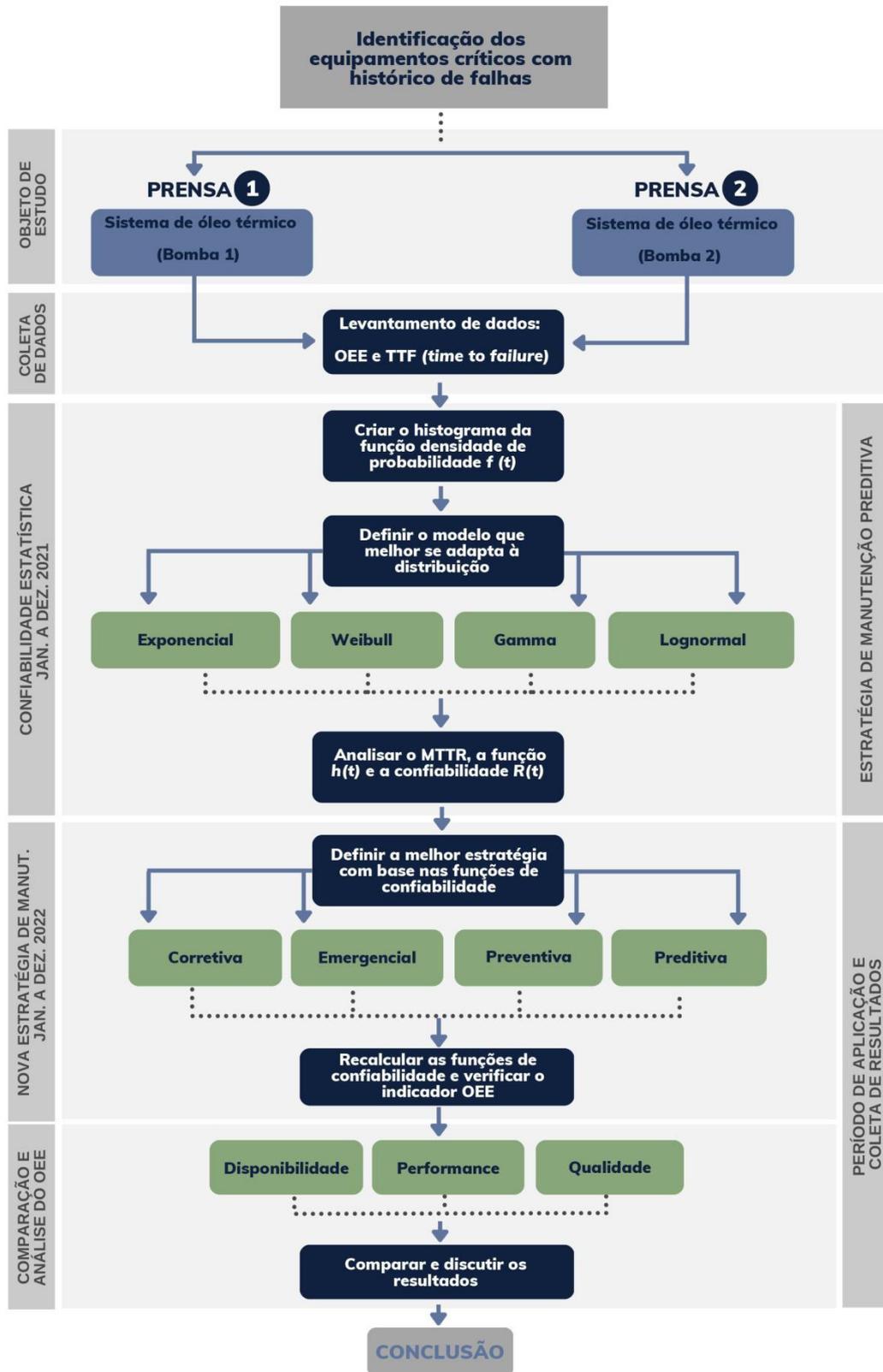
A empresa selecionada para o estudo de caso possui um sistema de planejamento de recursos empresariais (ERP - *Enterprise Resource Planning*) integrado à manutenção. Os dados operacionais para cálculo do OEE da máquina foram obtidos através do ERP com o auxílio de engenheiros de processo e de pessoas ligadas à produção. Já os dados de falha das bombas foram extraídos do módulo de gerenciamento dos ativos da manutenção.

Para o desenvolvimento deste trabalho, primeiramente foi elaborado um fluxograma contendo as etapas de pesquisa, o levantamento de dados e a análise dos resultados. Este fluxograma e as etapas desenvolvidas para a realização do estudo são apresentados no subcapítulo a seguir.

3.2 Etapas da pesquisa

A Figura 8 apresenta o fluxograma metodológico desenvolvido para a aplicação da confiabilidade estatística em duas bombas do sistema de aquecimento de duas prensas distintas.

Figura 8: Fluxograma para o desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como apresentado no fluxograma da Figura 8, foram nomeadas como bombas 1 e 2, aquelas instaladas nas prensas 1 e 2, respectivamente. Ao aplicar a confiabilidade estatística a dois sistemas distintos, buscou-se adotar estratégias de manutenção adequadas à taxa de risco de cada bomba, conforme a pesquisa realizada. Ao selecionar-se dois equipamentos idênticos, mas instalados em máquinas diferentes, o pesquisador investigou se ocorreu semelhança no comportamento apresentado por ambos ao final do estudo.

A identificação da oportunidade de melhoria, ao analisar dados de falha das bombas do sistema de óleo térmico, ocorreu não apenas devido à criticidade dos equipamentos para o processo, mas também pela possibilidade de replicar o experimento em diversos equipamentos similares, amplamente utilizados neste segmento da indústria.

Com a determinação das bombas como elementos centrais para o estudo da confiabilidade, foi utilizado o sistema ERP, no módulo de manutenção, para extrair o histórico de falhas. Através deste histórico, foi possível calcular o tempo até a falha (TTF). Já para calcular os índices que compõem o produto dos três fatores no cálculo do OEE, apresentados na Eq. (2.1), utilizou-se o módulo de gestão e controle da produção do sistema ERP.

Tendo os dados de tempo até a falha e OEE do período de janeiro a dezembro de 2021 disponíveis, foi criado o histograma da função densidade de probabilidade $f(t)$, e em seguida selecionado o modelo matemático que melhor se adapta a distribuição do item analisado. A análise e a decisão deste modelo são realizadas através da utilização do *ProConf@*. O software oferece uma série de características para ajudar na melhor escolha. Desta forma, é possível obter uma análise completa dos dados de falha, optando-se pela distribuição que melhor se adapta às bombas. Testes analíticos do Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov são utilizados no *ProConf@* para ajuste da distribuição e nível de significância. Além disso, pode-se adequar um ajuste do modelo através de métodos gráficos, chamado papel da probabilidade.

Definido o modelo matemático que melhor se adapta ao problema, foram analisadas as funções de confiabilidade do período. E com base na pesquisa apresentada nos capítulos 2.3 e 2.4, foi a partir da função risco $h(t)$ que se determinou

a melhor estratégia de manutenção a ser adotada em 2022. Este trabalho limitou-se as estratégias emergencial, corretiva, preventiva e preditiva.

Ao final do fluxograma, o indicador de eficiência global OEE é desmembrado em seus três fatores, e utilizado como métrica para comparação dos períodos de 2021 e 2022 (antes e após a utilização da confiabilidade estatística). Por este motivo, para realização do estudo foi compreendido o período total de dois anos. O primeiro ano, de janeiro a dezembro de 2021, foi o período no qual iniciaram-se os estudos e levantamento de dados. Neste ano, a prática adotada pela empresa na estratégia de manutenção das bombas era a preditiva. Já no início de 2022, a confiabilidade estatística passou a ter um papel central na escolha da melhor estratégia de manutenção, definida por meio dos resultados obtidos das funções de confiabilidade. Optou-se por analisar dois anos completos para que todas as estações do ano fossem compreendidas e submeter os equipamentos às mesmas condições médias de temperatura e umidade. Estabelecer este critério de tempo torna a análise dos dados obtidos de relevante importância, pois foi possível comparar dois períodos iguais em que diferentes estratégias de manutenção foram utilizadas. O capítulo seguinte apresenta os resultados obtidos.

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos e está dividido em dois tópicos. O primeiro mostra o levantamento dos dados e posterior processamento, que buscou identificar a fase em que o equipamento se encontrava no ano de 2021, na qual, através das funções de confiabilidade, determinou a estratégia de manutenção empregada ao longo do ano de 2022. Já o segundo tópico traz os resultados de 2022 obtidos com uso da confiabilidade estatística.

4.1 Resultados de 2021

Conforme mencionado anteriormente, o uso da manutenção preditiva como estratégia de manutenção de bombas era uma prática da empresa em 2021 e, de forma geral, o que se observou foi um elevado número de falhas nas bombas 1 e 2. Os subcapítulos a seguir apresentam os resultados de OEE das prensas e tempo até a falha das bombas de janeiro a dezembro de 2021.

4.1.1 OEE

A partir dos dados coletados no sistema de gestão ERP da produção, os mesmos são apresentados a Tabela 2 e Tabela 3. Os dados de disponibilidade, performance e qualidade, resultaram no OEE das Prensas 1 e 2 referente ao ano de 2021.

Tabela 2: OEE Prensa-1 ano de 2021.

mês/ano	Disponibilidade (%)	Performance (%)	Qualidade (%)	OEE (%)
jan/21	91,45%	72,06%	97,06%	63,96%
fev/21	95,16%	70,13%	97,59%	65,13%
mar/21	92,70%	63,34%	96,23%	56,50%
abr/21	88,21%	64,88%	96,79%	55,39%
mai/21	89,83%	63,58%	94,78%	54,13%
jun/21	91,18%	61,42%	95,60%	53,54%
jul/21	96,73%	74,64%	97,68%	70,52%
ago/21	96,62%	79,32%	97,79%	74,94%
set/21	96,48%	79,27%	98,24%	75,13%
out/21	95,29%	82,94%	98,40%	77,77%
nov/21	95,55%	73,10%	97,09%	67,81%
dez/21	93,83%	75,86%	97,89%	69,68%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3: OEE Prensa-2 ano de 2021.

mês/ano	Disponibilidade (%)	Performance (%)	Qualidade (%)	OEE (%)
jan/21	93,13%	74,91%	98,10%	68,44%
fev/21	95,61%	71,50%	97,89%	66,92%
mar/21	97,74%	73,46%	97,39%	69,93%
abr/21	98,00%	80,49%	98,22%	77,48%
mai/21	93,63%	79,80%	96,26%	71,92%
jun/21	97,74%	73,96%	96,57%	69,81%
jul/21	95,33%	84,30%	98,55%	79,20%
ago/21	95,35%	79,66%	97,86%	74,33%
set/21	95,41%	86,44%	98,29%	81,06%
out/21	93,73%	83,61%	98,15%	76,93%
nov/21	92,92%	78,05%	97,98%	71,06%
dez/21	94,22%	82,89%	98,45%	76,88%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos dados apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3, observa-se que o OEE resultou em valores abaixo de 85%, o que significa que as máquinas, de maneira geral, não estão em boa condição. Além disso, também pode sinalizar que a estratégia de manutenção da empresa necessita de melhorias, conforme apresentado no capítulo 2.1.

4.1.2 TTF – Tempo até a Falha

As falhas nas bombas são os principais motivos de paradas das prensas atualmente. Os dados dessas falhas são armazenados e compilados no módulo de gerenciamento e controle das máquinas no sistema ERP da empresa. O responsável pela gestão dos dados é o departamento de engenharia de manutenção da empresa. Esses dados também respeitam o mesmo período de apuração do OEE, sendo estes de janeiro a dezembro de 2021 e estão apresentados na Figura 9.

Figura 9: Tempo entre falhas, em horas, das bombas 1 e 2 – ano 2021.

TTF BOMBA PRENSA 1 [h]		TTF BOMBA PRENSA 2 [h]	
437,0	319,1	85,5	23,5
243,5	165,0	149,9	122,1
129,7	42,9	79,5	356,0
551,0	1,1	97,8	190,5
271,0	501,3	245,1	11,6
251,5	626,9	80,3	
1,5	30,4	52,5	
1,0	347,4	87,8	
123,3	35,0	195,3	
452,5	58,0	1,4	
59,9	24,0	154,3	
452,8	3,0	93,6	
95,0	389,3	50,6	

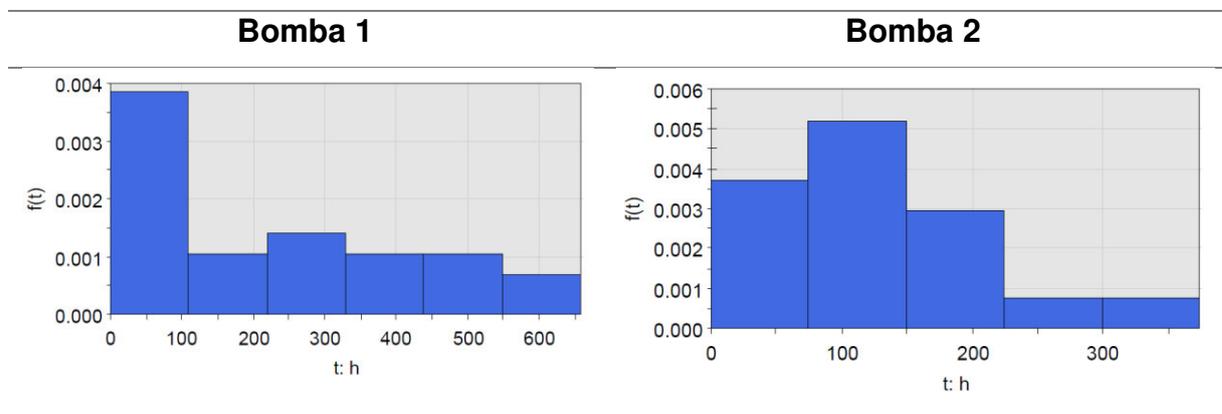
Fonte: Sistema ERP da empresa.

Na Figura 9, são apresentados os intervalos entre falhas, em horas, das bombas 1 e 2. Estes tempos são variáveis aleatórias relativas ao processo de quebra, também aleatório. Em 2021, o intervalo total resultou em 5612,9 e 2077,3 horas em operação, em que foram contabilizados vinte e seis e dezoito contagens de quebra para as bombas 1 e 2, respectivamente.

4.1.3 Funções de confiabilidade

Inicia-se este capítulo apresentando, na Figura 10, os histogramas da função densidade de probabilidade $f(t)$ das bombas 1 e 2, criados a partir da Figura 9 do *ProConf®*.

Figura 10: Histograma dos tempos até a falha das bombas 1 e 2 – ano 2021.



Fonte: Software *ProConf®*.

Ao analisar a Figura 10, observar-se que a maioria das falhas na bomba 1 ocorreu no intervalo entre 0 e 100 horas, enquanto que na bomba 2 ocorreu dentro do intervalo de 75 a 150 horas. Com base nos resultados apresentados, verificou-se a distribuição matemática que melhor representa a amostragem dos tempos até a falha das bombas. A Tabela 4 apresenta os resultados dos parâmetros de ajuste do tempo entre falhas para as bombas 1 e 2, para o ano de 2021. O nível de confiança é de 95%.

Tabela 4: Parâmetros de ajuste do tempo entre falhas para as bombas 1 e 2 ano 2021.

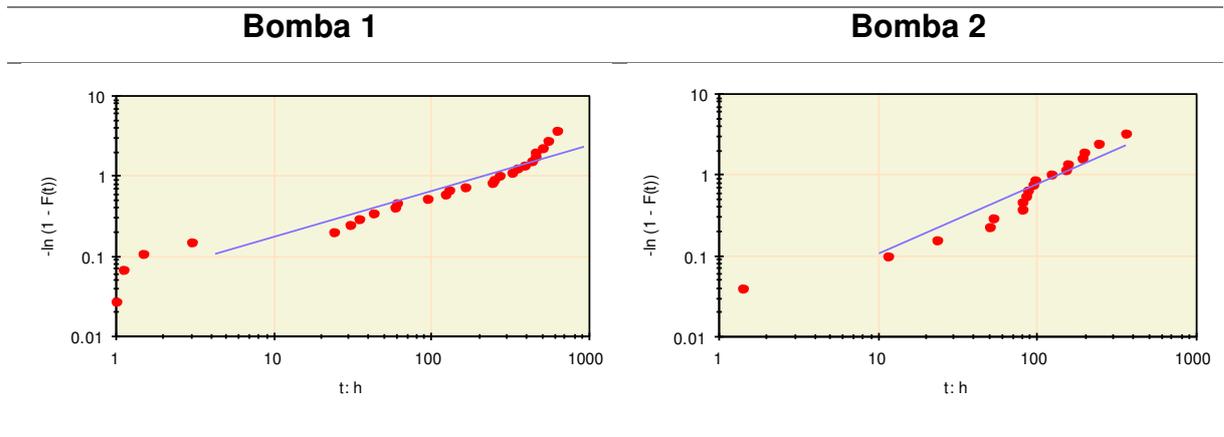
	t10 Bomba-1	t10 Bomba-2	t50 Bomba-1	t50 Bomba-2	MTTF Bomba-1	MTTF Bomba-2	γ ; θ Bomba-1	γ ; θ Bomba-2
Exponencial	22,75	Rejeitada	149,64	Rejeitada	215,89	Rejeitada		
Weibull	8,36	16,52	112,44	86,69	228,52	114,31	0,76 ; 191,11	1,23 ; 122,59
Gamma	6,55	14,75	123,66	86,85	231,11	121,65		
Lognormal	Rejeitada	Rejeitada	Rejeitada	Rejeitada	Rejeitada	Rejeitada		

Fonte: Software *ProConf*®, adaptado.

Os dados apresentados na Tabela 4 resumem os resultados dos modelos testados, sendo eles: exponencial, Weibull, gamma e lognormal, onde *t10* representa os tempos característicos para uma confiabilidade de 90% e *t50* representa os tempos característicos para uma confiabilidade de 50%. A partir dos parâmetros de ajuste do tempo, o software *ProConf*® também calcula o tempo médio da falha (*MTTF*) e os parâmetros de forma γ e de escala θ . Apesar dos modelos Weibull e Gamma não serem rejeitados, dentre os ajustes obtidos, adotou-se o modelo de Weibull, já que o mesmo engloba o modelo exponencial e porque é o modelo indicado quando muitos modos de falha concorrem entre si, como no caso de bombas (BRENEMAN, 2022).

A adequação de um ajuste, através de métodos gráficos (papel da probabilidade), também foi verificada nos modelos testados, sendo Weibull o modelo com melhor resultado tanto para a bomba 1 quando para a bomba 2. Estes resultados são apresentados na Figura 11 e as outras análises podem ser encontradas no apêndice E/G.

Figura 11: Papel da probabilidade - Weibull bombas 1 e 2 – ano 2021.

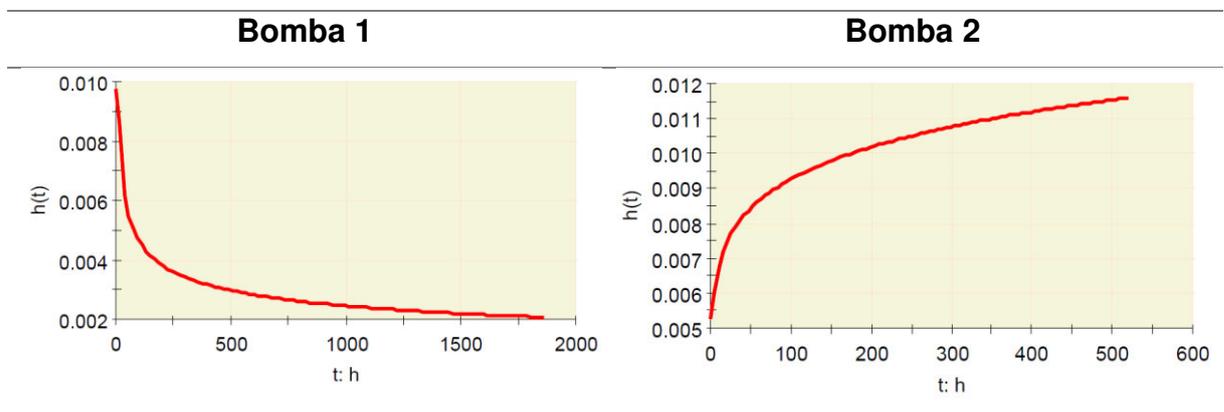


Fonte: Software *ProConf*®.

Através dos resultados verificados e apresentados na Tabela 4 e Figura 11, o parâmetro de forma γ tornou-se uma variável de especial interesse deste estudo, já que a partir dele, pode-se determinar a fase da vida em que o equipamento se encontra, conforme proposto por Mengue e Sellitto (2013) e apresentado na Figura 2.

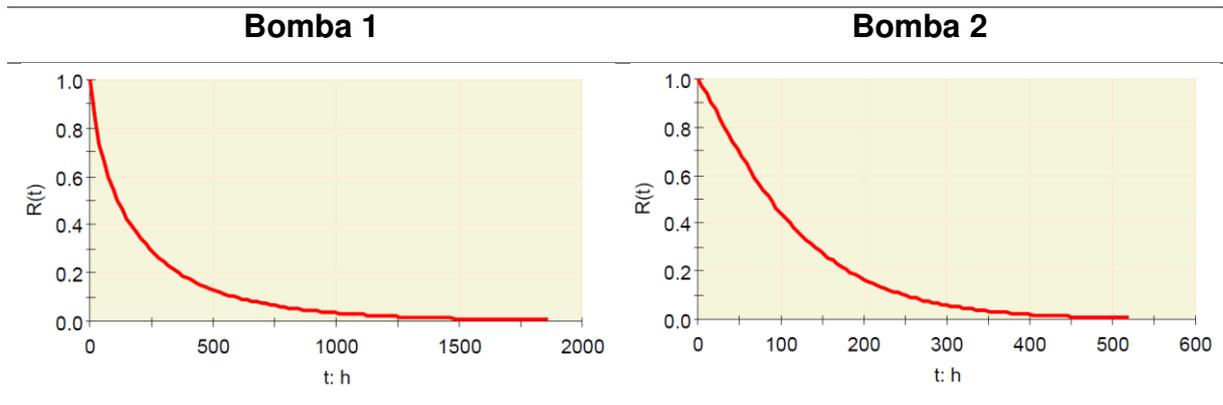
Com base no modelo de Weibull, foram plotados os gráficos da função risco $h(t)$ e o gráfico da função confiabilidade $R(t)$ para as bombas 1 e 2. A Figura 12 e a Figura 13 representam, respectivamente, o risco de quebra dos equipamentos e a confiabilidade em 2021.

Figura 12: Função $h(t)$ das bombas 1 e 2 em 2021.



Fonte: Software *ProConf*®.

Figura 13: Função $R(t)$ das bombas 1 e 2 em 2021.



Fonte: Software *ProConf*®.

A partir dos gráficos apresentados na Figura 12 e na Figura 13, pode-se assumir que a bomba 1 encontra-se na fase de mortalidade infantil. O parâmetro de forma $\gamma = 0,76$, obtido na Tabela 4, indica que as falhas prematuras ou de origem ocorrem predominantemente. Outro fator que reforça essa hipótese, e pode ser verificado ao analisar a Figura 10, é que a maioria das falhas de componentes está concentrada nos primeiros intervalos de tempo.

Já a bomba 2, em que os intervalos de falha no tempo estão mais distribuídos, conforme observado na Figura 10, encontra-se na fase de maturidade para desgaste, com $\gamma = 1,23$ e pode ser verificado na Tabela 4. Tabelas completas com os resultados das funções de confiabilidade podem ser verificadas no apêndice A/C.

Os resultados apresentados neste capítulo representam a condição das bombas 1 e 2 no ano de 2021. Por meio do levantamento de dados de produção, foi possível determinar o OEE das prensas e, com o uso do software de controle e gerenciamento de manutenção do departamento de engenharia de manutenção, foram apurados os tempos até a falha das duas bombas analisadas.

Ao final deste capítulo foram realizadas análises das funções de confiabilidade utilizando o software *ProConf*®. Após a verificação de que a distribuição seguia o modelo de Weibull, foi possível determinar os parâmetros de forma γ da função $h(t)$ de ambas as bombas. Por fim, com base na literatura, foi determinada a melhor estratégia de manutenção a ser utilizada ao longo de 2022. Estas estratégias de

manutenção, com base nos resultados das funções de confiabilidade, são apresentadas na Tabela 5.

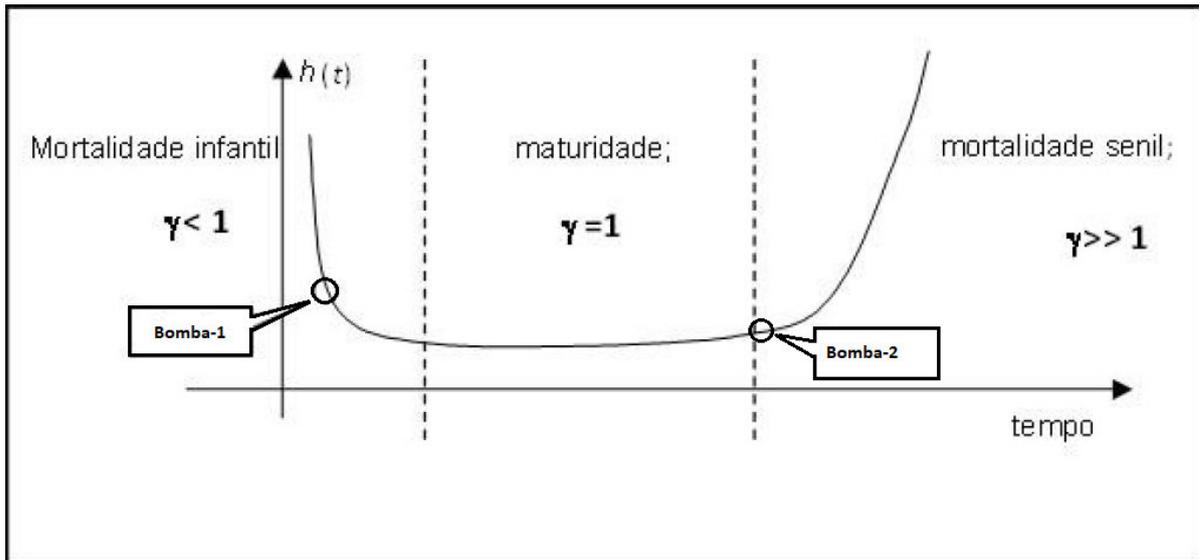
Tabela 5: Estratégia de manutenção adotada para bombas em função da confiabilidade.

Equipamento	γ	Fase	Estratégia adotada em 2022	Decorrência
Bomba -1	0,76	mortalidade infantil, falhas prematuras	Corretiva	antecipa o fim da mortalidade infantil ao reforçar os itens que quebraram ou remover as causas das falhas de origem
Bomba -2	1,23	desgaste / envelhecimento falhas progressivas	Preventiva	previne a emergência antecipando a troca à quebra que realmente vai ocorrer, porém a um custo interno mais alto do que a emergência

Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na Tabela 5, a estratégia adotada para a bomba 1 é a corretiva. Esta estratégia visa antecipar o fim das falhas prematuras, reforçando aqueles itens que quebram e eliminando as causas das falhas. Apesar da bomba 2 apresentar indícios de uma evolução da fase de maturidade para a fase de desgaste, assumiu-se a estratégia de manutenção preventiva, uma vez que os resultados inferiores a 85% no OEE da prensa 2 foram observados e a estratégia de preditiva já vinha sendo utilizada. O objetivo da manutenção preventiva, que pode ser acompanhada de reforma, é prevenir a manutenção emergencial, antecipando a troca de componentes que irão falhar e visando também retornar o equipamento para a fase de maturidade. Para uma melhor visualização, a Figura 14 mostra a posição das bombas 1 e 2 na “curva da banheira” em 2021.

Figura 14: Posição das bombas 1 e 2 na curva da banheira ano 2021.



Fonte: elaborado pelo autor.

O capítulo seguinte é estruturado de forma semelhante a este e apresenta os resultados com base em dados de falha coletados ao longo do ano de 2022. Neste ano foi utilizada a confiabilidade estatística para determinar a estratégia de manutenção mais adequada para as bombas. Os resultados são apresentados ao final em termos de confiabilidade do equipamento, disponibilidade, performance e qualidade da máquina.

4.2 Resultados de 2022 com o uso da confiabilidade estatística

Após iniciada a operação, de janeiro a dezembro de 2022, as bombas 1 e 2 foram monitoradas e as intervenções de manutenção foram assistidas e controladas pela equipe do departamento de engenharia de manutenção. Os subcapítulos a seguir apresentam os resultados obtidos decorrentes do uso da manutenção corretiva para a bomba 1 e da manutenção preventiva para a bomba 2.

4.2.1 TTF – Tempo até a Falha

A partir da realização da coleta e interpretação dos dados de falhas, assim como realizado no ano de 2021 e apresentado na Figura 9, a Figura 15 apresenta os resultados de TTF das bombas 1 e 2 em 2022, em doze meses após a adoção de novas estratégias de manutenção.

Figura 15: Tempo entre falhas, em horas, das bombas 1 e 2 – ano 2022.

TTF BOMBA PRENSA 1 [h]		TTF BOMBA PRENSA 2 [h]
216,2	666,0	162,0
425,0	542,0	34,9
389,2	629,0	104,7
221,4	367,0	246,5
205,8		171,1
293,0		396,7
501,7		304,7
662,9		336,0
58,9		214,4
723,0		430,8
164,9		78,5
198,8		92,3
684,8		

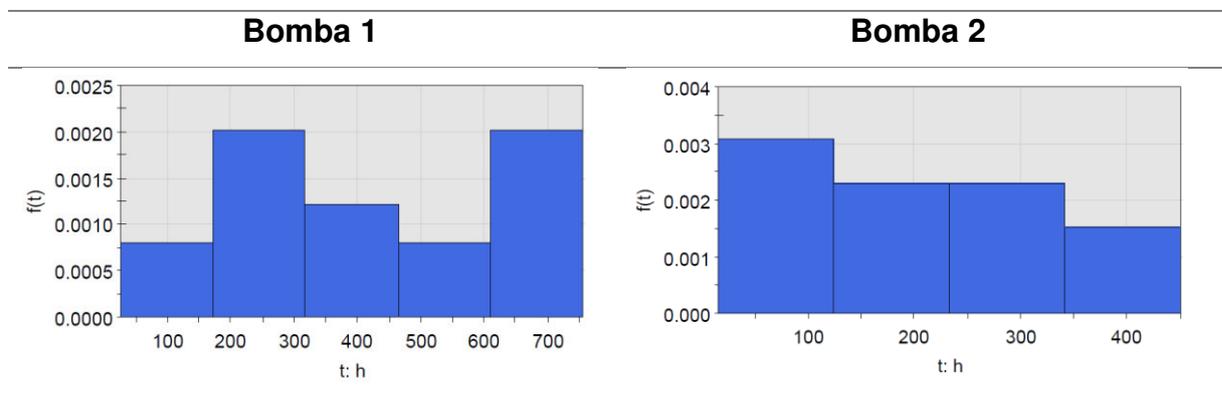
Fonte: Sistema ERP da empresa.

A Figura 15 apresenta os intervalos entre falhas, em horas, das bombas 1 e 2 no período de janeiro a dezembro de 2022. O tempo de operação da bomba 1 foi de 6949,6 horas, enquanto a bomba 2 registrou 2572,6 horas de operação. Essa diferença ocorreu principalmente devido aos padrões de textura e acabamento do MDF que é produzido em cada uma das prensas, sendo que estes variam de acordo com o número de pedidos e a disponibilidade de insumos no momento da produção. O maior aproveitamento da prensa 1, máquina em que a bomba 1 está instalada, ocorreu principalmente devido a questões de layout e processo. Ao final do acompanhamento foram contabilizadas dezessete e doze contagens de quebra atribuídas às bombas 1 e 2, respectivamente.

4.2.2 Funções de confiabilidade

Com base no levantamento dos tempos entre falhas, apresentados na Figura 15, foram desenvolvidos os histogramas da função densidade de probabilidade $f(t)$, criados a partir do software *ProConf@* para as bombas 1 e 2, mostrados na Figura 16.

Figura 16: Histograma dos tempos até a falha das bombas 1 e 2 – ano 2022.



Fonte: Software *ProConf@*.

Os histogramas da Figura 16 apresentam a distribuição da função densidade de probabilidade em intervalos. É possível observar que a maioria das falhas da bomba 1 está concentrada em dois intervalos distintos. Já na bomba 2, a maioria das falhas ocorre no intervalo de 0 a 125 horas. Assim como realizado para o ano anterior, foi analisada a distribuição matemática que melhor representa a amostragem dos tempos até a falha das bombas. A Tabela 6 apresenta os resultados dos parâmetros de ajuste do tempo entre falhas para as bombas 1 e 2 do ano de 2022, com nível de confiança de 95%.

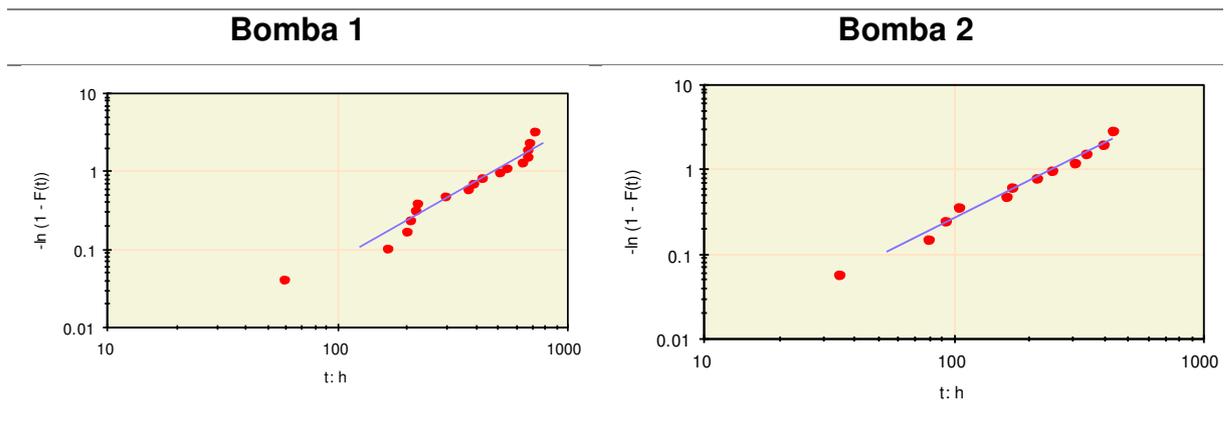
Tabela 6: Parâmetros de ajuste do tempo entre falhas para as bombas 1 e 2 ano 2022.

	t10 Bomba-1	t10 Bomba-2	t50 Bomba-1	t50 Bomba-2	MTTF Bomba-1	MTTF Bomba-2	$\gamma; \theta$ Bomba-1	$\gamma; \theta$ Bomba-2
Exponencial	Rejeitada	22,59	Rejeitada	148,6	Rejeitada	214,38		
Weibull	138,41	55,47	374,19	185,33	402,97	210,62	2,06 ; 461,39	1,77 ; 241,05
Gamma	135,57	56,2	364,71	186,06	418,58	224,32		
Lognormal	147,91	68,06	343,09	172,17	425,58	223,78		

Fonte: Software *ProConf*®, adaptado.

A Tabela 6 mostra o resultado dos parâmetros de ajuste do tempo entre falhas para as bombas 1 e 2 ao longo do ano de 2022. O tempo para uma confiabilidade de 90%, t_{10} , e tempo característico t_{50} para uma confiabilidade de 50% também foram obtidos e são apresentados. Por meio de um ajuste através de métodos gráficos (papel da probabilidade), utilizou-se o modelo de Weibull para ambas as bombas, os resultados são apresentados na Figura 17. Os resultados das demais análises podem ser encontrados no apêndice F/H.

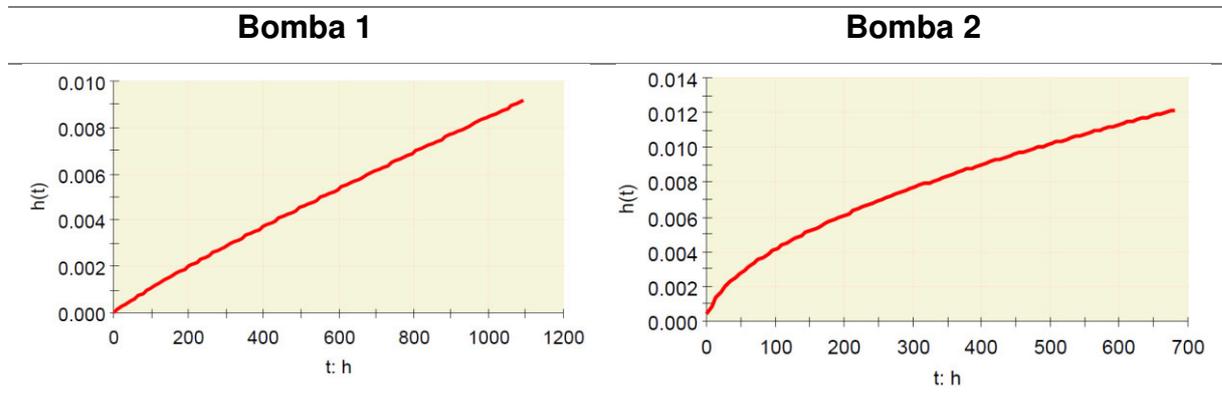
Figura 17: Papel da probabilidade - Weibull bombas 1 e 2 – ano 2022.



Fonte: Software *ProConf*®.

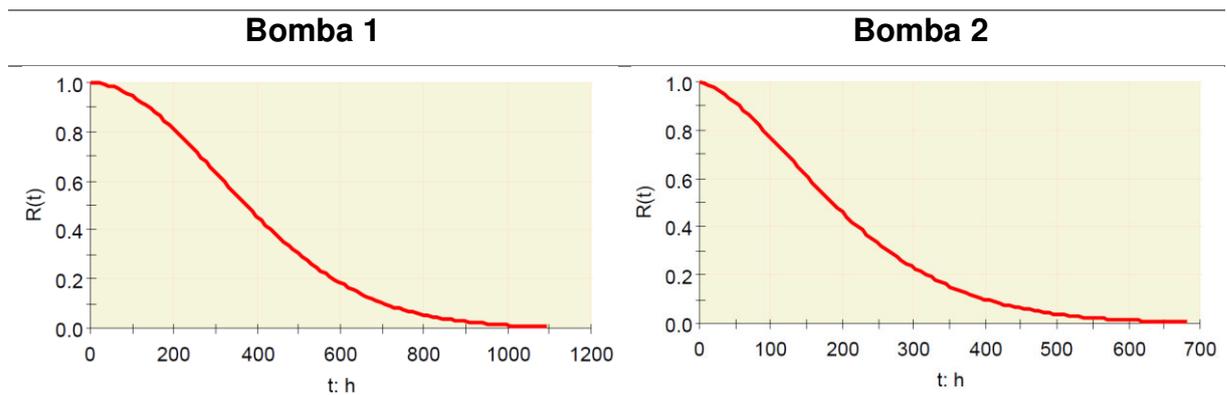
Sendo Weibull o modelo matemático adotado, a Figura 18 e Figura 19 apresentam, respectivamente, os gráficos da função risco $h(t)$ e os gráficos da função confiabilidade $R(t)$ para as bombas 1 e 2 do ano de 2022.

Figura 18: Função $h(t)$ das bombas 1 e 2 em 2022.



Fonte: Software *ProConf*®.

Figura 19: Função $R(t)$ das bombas 1 e 2 em 2022.

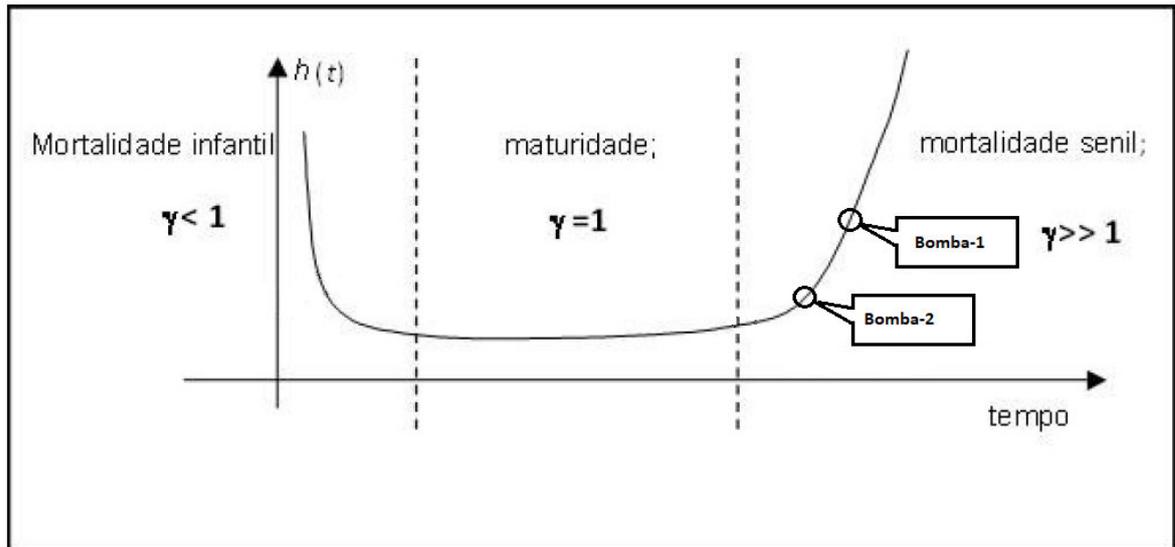


Fonte: Software *ProConf*®.

O resultado gráfico da função risco $h(t)$ das bombas, apresentado na Figura 18, e a verificação do parâmetro de forma $\gamma= 2,06$ para a bomba 1 e $\gamma= 1,77$ para a bomba 2 na Tabela 6, indicam que ambas as bombas apresentam características de falha quando o equipamento se encontra na fase de mortalidade senil, ou seja, falhas caracterizadas predominantemente pelo seu desgaste. Os resultados de MTTF foram 402,97 e 210,62 horas para as bombas 1 e 2, respectivamente. Tabelas completas com os resultados das funções de confiabilidade podem ser verificadas no apêndice B/D.

Assim como realizado para o ano de 2021 e apresentado na Figura 14, a Figura 20 mostra, de forma representativa, a posição das bombas 1 e 2 na curva da banheira no ano de 2022.

Figura 20: Posição das bombas 1 e 2 na curva da banheira ano 2022.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados neste capítulo demonstram a confiabilidade das bombas 1 e 2 no ano de 2022, período no qual foi utilizada a estratégia de manutenção corretiva para a bomba 1 e de manutenção preventiva para a bomba 2, conforme proposto na Tabela 5 e determinado a partir do estudo da confiabilidade estatística de cada um dos equipamentos.

O capítulo a seguir apresenta os resultados de OEE das prensas 1 e 2, equipamentos nos quais estão instaladas as bombas do sistema de aquecimento por óleo térmico.

4.2.3 OEE

A partir dos dados disponíveis no sistema ERP de controle da produção e, encerrado o período no qual a confiabilidade estatística foi testada nas bombas, a Tabela 7 e Tabela 8 apresentam os resultados de disponibilidade, performance e qualidade que resultam no OEE das Prensas 1 e 2, referente ao ano de 2022.

Tabela 7: OEE Prensa-1 ano de 2022.

mês/ano	Disponibilidade (%)	Performance (%)	Qualidade (%)	OEE (%)
jan/22	94,20%	71,00%	97,97%	65,53%
fev/22	87,04%	65,66%	97,11%	55,50%
mar/22	92,50%	65,18%	97,25%	58,63%
abr/22	97,20%	62,52%	97,45%	59,22%
mai/22	95,68%	63,18%	94,76%	57,28%
jun/22	94,48%	63,20%	96,34%	57,53%
jul/22	88,70%	73,69%	96,97%	63,38%
ago/22	97,46%	73,13%	97,57%	69,54%
set/22	98,49%	78,42%	98,13%	75,79%
out/22	97,77%	75,72%	98,30%	72,77%
nov/22	94,06%	82,73%	98,78%	76,87%
dez/22	97,88%	77,99%	98,80%	75,42%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8: OEE Prensa-2 ano de 2022.

mês/ano	Disponibilidade (%)	Performance (%)	Qualidade (%)	OEE (%)
jan/22	88,54%	78,08%	98,00%	67,74%
fev/22	98,20%	84,14%	97,27%	80,37%
mar/22				
abr/22	93,37%	83,21%	97,80%	75,99%
mai/22	93,87%	76,06%	96,28%	68,74%
jun/22	89,40%	72,55%	96,21%	62,41%
jul/22	93,34%	78,35%	97,02%	70,95%
ago/22	96,91%	72,12%	96,56%	67,48%
set/22	94,94%	79,53%	97,20%	73,39%
out/22	96,72%	82,76%	97,17%	77,78%
nov/22	97,00%	78,20%	98,30%	74,56%
dez/22	96,68%	85,12%	97,92%	80,58%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados na Tabela 7 e na Tabela 8 indicam a eficiência global das máquinas. A prensa 1 apresentou um OEE de 55,50% até no máximo 76,87%, enquanto a prensa 2, que não operou no mês de março devido à parada programada de manutenção, oscilou de 62,41% a 80,58%. Estes dados revelam uma baixa performance (com grande impacto na composição do cálculo do OEE), originados principalmente por velocidade reduzida, inatividade e pequenas paradas, conforme mostrados na Figura 1. O subcapítulo a seguir apresenta as principais falhas encontradas nas bombas.

4.2.4 Principais falhas encontradas

As principais falhas observadas em 2022 foram: falhas de rolamento; e vazamento ou falha de selagem. Modificações realizadas ao longo dos anos de uso do equipamento, como por exemplo, o uso de diferentes lubrificantes e a alteração do tipo de selagem, foram indicados como as possíveis causas da redução da confiabilidade das bombas. A Tabela 9 e Tabela 10 apresentam os principais defeitos encontrados para as bombas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 9: Principais defeitos encontrados na bomba-1.

Equipamento	Horas	Defeitos
Bomba 1	437,0	ROLAMENTO
Bomba 1	243,5	ROLAMENTO
Bomba 1	129,7	ROLAMENTO
Bomba 1	551,0	ROLAMENTO
Bomba 1	271,0	SELAGEM/VAZAMENTO
Bomba 1	251,5	ROLAMENTO
Bomba 1	1,5	SELAGEM/VAZAMENTO
Bomba 1	1,0	SELAGEM/VAZAMENTO
Bomba 1	123,3	ROLAMENTO
Bomba 1	452,5	ROLAMENTO
Bomba 1	59,9	SELAGEM/VAZAMENTO
Bomba 1	452,8	ROLAMENTO
Bomba 1	95,0	SELAGEM/VAZAMENTO
Bomba 1	666,0	ROLAMENTO
Bomba 1	542,0	ROLAMENTO
Bomba 1	629,0	ROLAMENTO
Bomba 1	367,0	ROLAMENTO

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 10: Principais defeitos encontrados na bomba-2.

Equipamento	h	Defeitos
Bomba 2	162,0	ROLAMENTO
Bomba 2	34,9	SELAGEM/VAZAMENTO
Bomba 2	104,7	ROLAMENTO
Bomba 2	246,5	ROLAMENTO
Bomba 2	171,1	SELAGEM/VAZAMENTO
Bomba 2	396,7	ROLAMENTO
Bomba 2	304,7	ROLAMENTO
Bomba 2	336,0	ROLAMENTO
Bomba 2	214,4	ROLAMENTO
Bomba 2	430,8	ROLAMENTO
Bomba 2	78,5	SELAGEM/VAZAMENTO
Bomba 2	92,3	SELAGEM/VAZAMENTO

Fonte: elaborado pelo autor.

Como a bomba 1 encontrava-se na fase de mortalidade infantil (conforme apresentado na Tabela 5), a manutenção corretiva não trouxe nenhum tipo de prejuízo, pois se pode reduzir ou até mesmo eliminar as falhas prematuras, originárias principalmente de deficiências de projeto ou da instalação. A adoção desta estratégia com participação da equipe responsável foi essencial para obtenção dos resultados apresentados neste subcapítulo.

Foram realizadas investigações por meio de análises técnicas junto a fabricantes e fornecedores de peças de reposição ao longo de 2022. A redução da incidência das falhas é um indicativo de que o equipamento pode migrar em direção a fase de maturidade e de que as ações foram assertivas e tiveram êxito. No mês de março de 2022 ocorreu uma parada programada de manutenção na prensa 2 e a bomba passou por uma manutenção preventiva em assistência técnica autorizada do fabricante. Já a bomba 1 passou por ações de correção e de melhorias na lubrificação. A Figura 21 mostra um rolamento da bomba 1, no qual foi identificada a falha de lubrificação.

Figura 21: Identificação da falha de lubrificação em rolamento da bomba-1.



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme cartilha técnica fornecida pelo fabricante de rolamentos, que consta no Anexo A deste trabalho, o rolamento apresentado na Figura 21 (a) sofreu uma falha causada por lubrificação inadequada, ocasionada tipicamente por altas temperaturas de operação provocando o descascamento e deformação da pista por geração excessiva de calor, conforme mostrado em detalhe na Figura 21 (b).

Com base nos dados apresentados na Tabela 9, na Tabela 10 e na Figura 21, foram alterados o selo mecânico e o lubrificante por especificações recomendadas pelos fabricantes. A Figura 22 (a) mostra a bomba 1 após manutenção durante troca do lubrificante e a Figura 22 (b) mostra o lubrificante utilizado. A ficha técnica pode ser encontrada no Anexo B deste trabalho.

Figura 22: Manutenção corretiva e lubrificação da bomba-1.



(a)



(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

O capítulo seguinte mostra a análise e discussão dos resultados apresentados até aqui, através da comparação da pesquisa com os números de 2021 e 2022.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados mostraram a importância da análise prévia dos tempos de falha das bombas e da coleta de dados do OEE para a validação do uso da confiabilidade estatística como uma ferramenta de apoio para definir a melhor estratégia de manutenção a ser adotada. A compreensão do emprego destas técnicas estatísticas permitiu, através da literatura técnica, um melhor entendimento do comportamento dos modos de falha das bombas, sendo estes equipamentos de grande importância em um processo sensível à temperatura, como visto no ambiente de uma indústria fabricante de chapas de MDF.

A utilização do *ProConf®*, como ferramenta de trabalho para a elaboração dos cálculos e obtenção de resultados, possibilitou análises complexas e com diferentes modelos matemáticos. A distribuição por Weibull e os resultados apresentados do parâmetro de forma γ permitiram a identificação da fase da vida na qual o equipamento encontrava-se em 2021 e, com base na pesquisa, foi possível determinar a melhor estratégia de manutenção a ser adotada em 2022.

Para permitir uma melhor discussão dos resultados, foi elaborada a Tabela 11, a qual apresenta os resultados comparando os parâmetros de ajuste de Weibull do ano de 2021 (ano no qual foram seguidas práticas da empresa com uso da preditiva como estratégia de manutenção) com os resultados do ano de 2022 em que foi realizado o uso da confiabilidade estatística.

Tabela 11: Comparação dos parâmetros de ajuste do tempo entre falhas para as bombas 1 e 2 anos 2021 e 2022 – Modelo de Weibull.

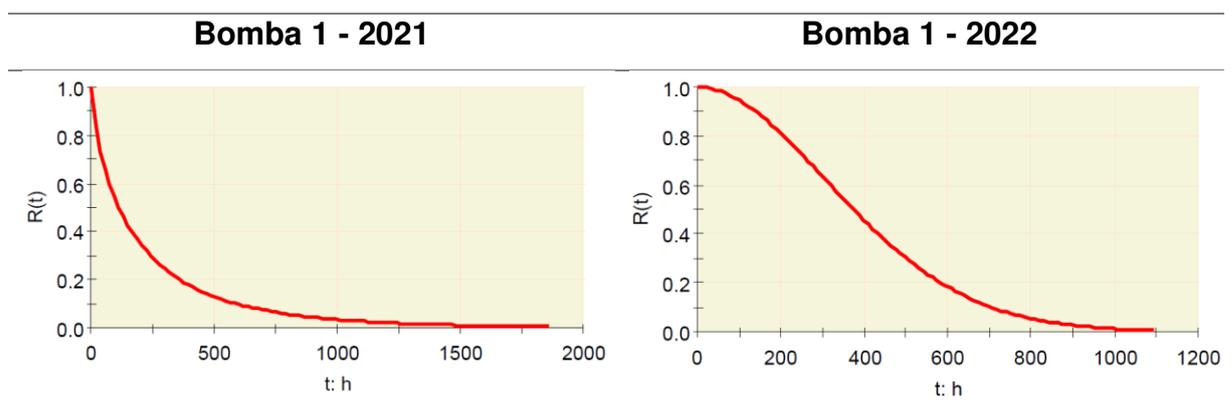
	t10 Bomba-1	t10 Bomba-2	t50 Bomba-1	t50 Bomba-2	MTTF Bomba-1	MTTF Bomba-2	γ ; θ Bomba-1	γ ; θ Bomba-2
2021	8,36	16,52	112,44	86,69	228,52	114,31	0,76 ; 191,11	1,23 ; 122,59
2022	138,41	55,47	374,19	185,33	402,97	210,62	2,06 ; 461,39	1,77 ; 241,05

Fonte: Software *ProConf®*, adaptado.

Como pode ser observado na Tabela 11, o uso da estratégia de manutenção corretiva para a bomba 1 ao longo de 2022 alterou o parâmetro de forma γ de 0,76 para 2,06, resultando na evolução da fase de mortalidade infantil para a fase de envelhecimento (fase na qual as falhas são caracterizadas principalmente pelo desgaste). A confiabilidade t_{10} da bomba 1 evoluiu de 8,36 para 138,41 horas de operação, enquanto a confiabilidade t_{50} de 112,44 para 374,19 horas. O tempo médio até a falha (MTTF) saltou de 228,52 para 402,97 horas, o que representa um aumento de 76,34%.

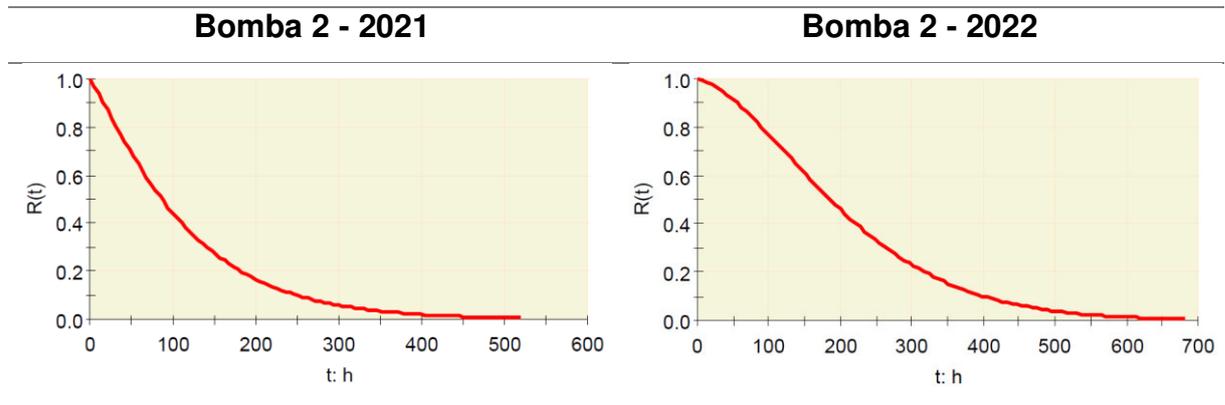
A bomba 2, que por meio do emprego da preventiva, permaneceu na fase de envelhecimento e apresentou melhora de 84,25% com o MTTF a 210,62 em 2022 em comparação com 114,31 horas de operação apurados em 2021. Já a confiabilidade t_{10} da bomba 2 evoluiu de 16,52 para 55,47 horas de operação, enquanto a confiabilidade t_{50} de evoluiu de 86,69 para 185,33 horas. A Figura 23 e Figura 24 apresentam as alterações da função confiabilidade $R(t)$ das bombas 1 e 2, respectivamente, nestes dois anos.

Figura 23: Comparação função $R(t)$ da bomba-1 anos 2021 e 2022.



Fonte: Software *ProConf*®.

Figura 24: Comparação função $R(t)$ da bomba-2 anos 2021 e 2022.

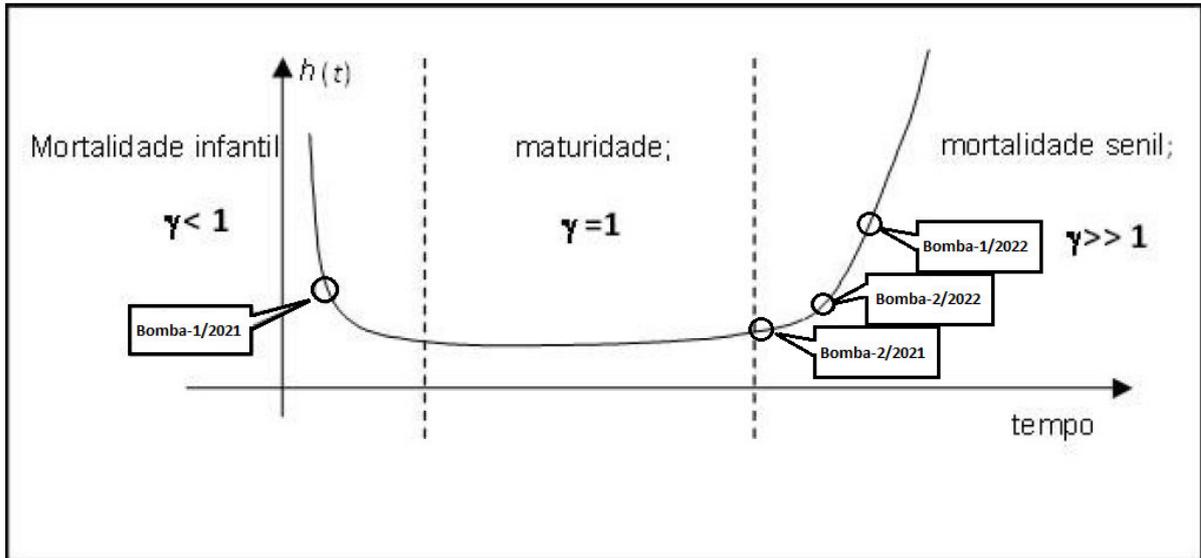


Fonte: Software *ProConf*®.

É possível se observar, ao analisar a Figura 23 e a Figura 24, a evolução na confiabilidade das bombas. Isso pode ser notado pelo aumento da área abaixo da linha da função e também pelos resultados apresentados na Tabela 11. Este comportamento, verificado em ambos os equipamentos, indica uma validação do modelo estatístico adotado e o êxito na adoção das estratégias de manutenção, coincidindo com a pesquisa realizada.

Na Figura 25 é possível verificar que ambas as bombas, ao final de 2022, encontravam-se na fase de mortalidade senil, fase na qual a tendência às falhas por desgaste torna-se mais recorrente. Desta forma, sugeriu-se ao departamento responsável pela manutenção das bombas manter manutenção preventiva para a bomba 2 e alterar de manutenção corretiva para manutenção preventiva na bomba 1 como estratégia de manutenção para 2023.

Figura 25: Posição das bombas 1 e 2 na curva da banheira anos 2021 e 2022.

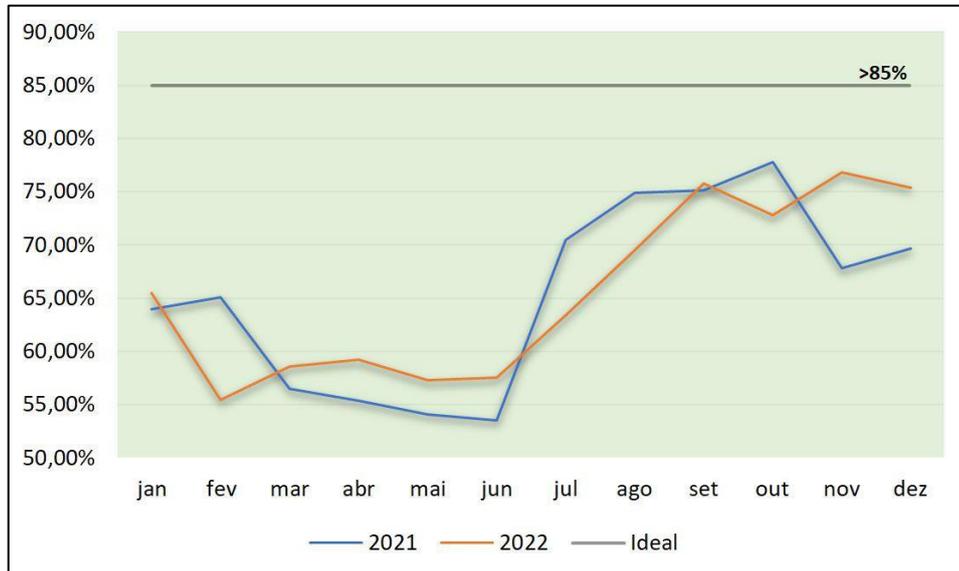


Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a Figura 25, também é possível afirmar a importância de que se haja a continuidade do processo de monitoramento das falhas de forma automatizada ou periódica, a fim de identificar se o desgaste continuará com tendência de aumento para as bombas 1 e 2, para então, neste caso, realizar uma reforma ou a substituição do equipamento se necessário.

Embora observado uma melhora significativa na confiabilidade das bombas, com resultados de MTTR de 76,34% e 84,25% maiores na comparação 2021/2022, sendo que estes fatores contribuem para aumento da disponibilidade destes equipamentos, o OEE da máquina apresentou comportamento semelhante ao ano anterior. A Figura 26 mostra um comparativo da prensa 1, que apesar de encerrar dezembro de 2022 com resultado superior, não permite afirmar que exista uma tendência de continuidade do aumento do OEE.

Figura 26: Comparação OEE prensa-1 anos 2021 e 2022.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se, na Figura 26, que o OEE resultou em valores abaixo de 85% e isso, apesar dos significativos avanços mencionados naquilo que tange os resultados obtidos nas bombas do sistema de aquecimento, significa que a máquina, de maneira geral, permanece em um estado no qual não está em boas condições. Um comportamento semelhante pôde ser verificado na prensa 2 e é ilustrado na Figura 27, que apresenta este mesmo comparativo.

Figura 27: Comparação OEE prensa-2 anos 2021 e 2022.



Fonte: elaborado pelo autor.

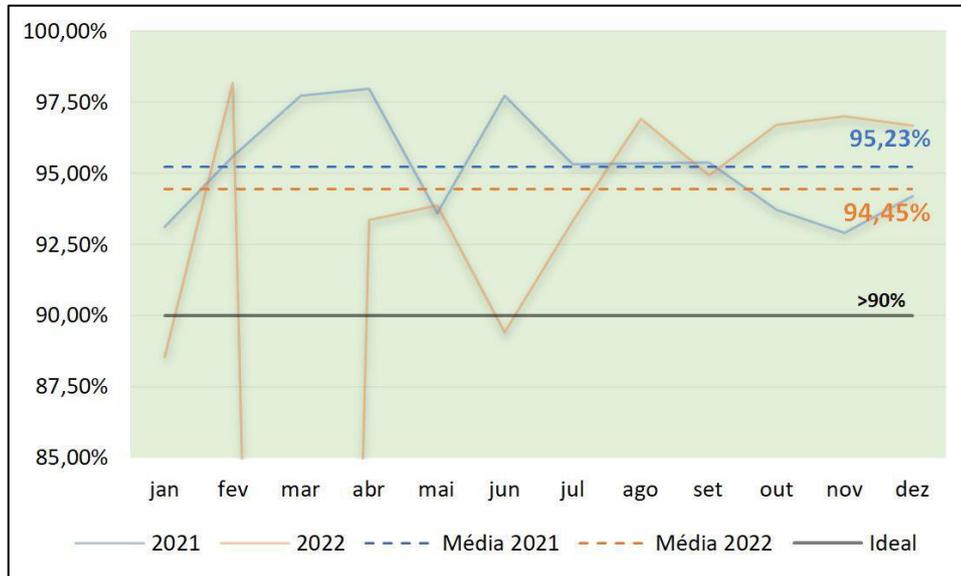
Ainda, verificou-se os resultados de disponibilidade de forma isolada com o objetivo de dar maior profundidade à análise apresentada na Figura 26 e na Figura 27. Estes resultados são apresentados na Figura 28 e na Figura 29, respectivamente, para as prensas 1 e 2.

Figura 28: Comparação da disponibilidade prensa 1 anos 2021 e 2022.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 29: Comparação da disponibilidade prensa 2 anos 2021 e 2022.

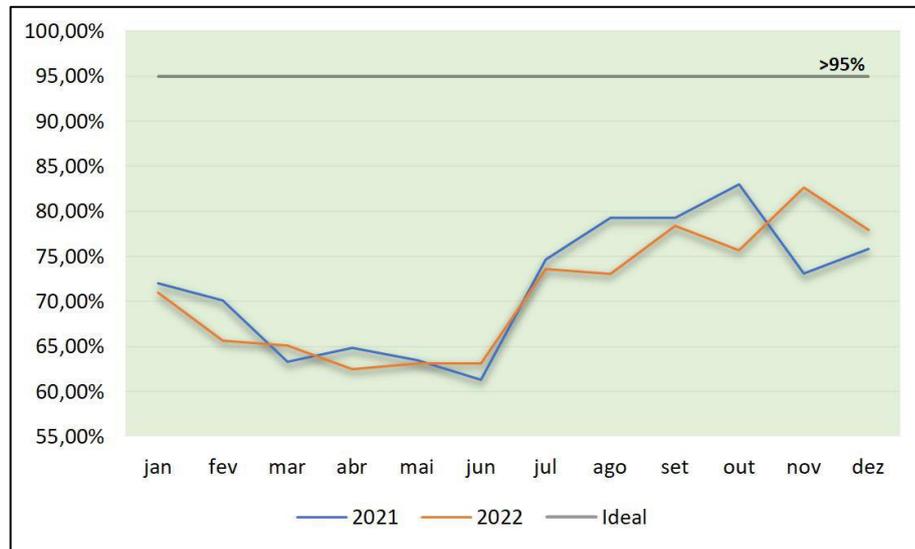


Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 28 mostra que a disponibilidade média da prensa 1 atingiu um valor 1,04% superior no fechamento deste estudo na comparação 2022/2021. Já a prensa 2 encerrou 2022 com 0,78% abaixo na comparação com o ano anterior aos 94,45%, predominantemente por quedas de disponibilidade que ocorreram após a parada programada realizada no mês de março de 2022, conforme apresentado na Figura 29.

Conforme a pesquisa realizada, o *benchmark* do OEE aceito mundialmente é de 85%, sendo que disponibilidade, performance e qualidade deveriam ser maiores que 90, 95 e 99 por cento, respectivamente. Sendo assim, o que se pôde observar durante o período da utilização da confiabilidade estatística foi uma manutenção da disponibilidade acima de 90 por cento (Figura 28 e Figura 29). Além disso, houve uma dificuldade da empresa em atingir os resultados ideais de performance e qualidade conforme se pode observar nos gráficos da Figura 30 e da Figura 31 para a prensa 1 e nos gráficos da Figura 32 e da Figura 33 para a prensa 2.

Figura 30: Comparação da performance prensa 1 anos 2021 e 2022.



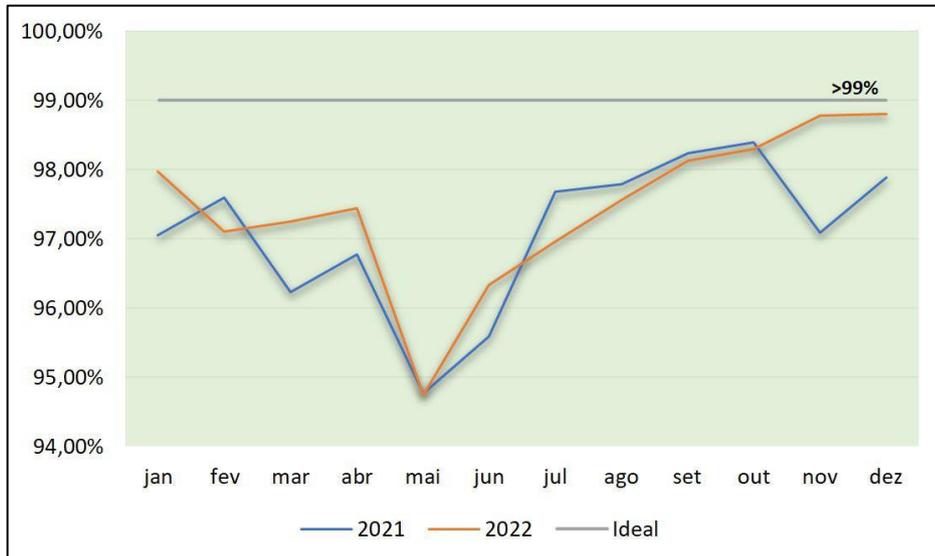
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 31: Comparação da performance prensa 2 anos 2021 e 2022.



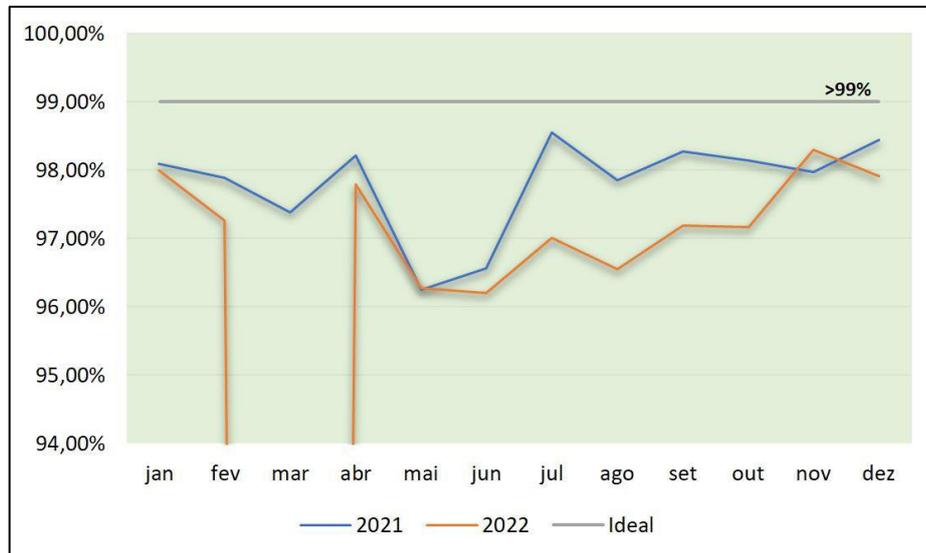
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 32: Comparação da qualidade prensa 1 anos 2021 e 2022.



Fonte: elaborado pelo autor.

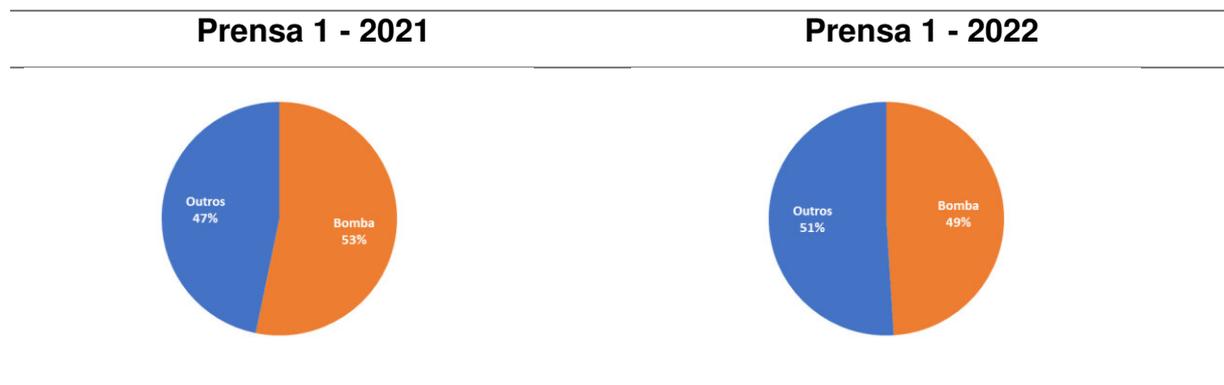
Figura 33: Comparação da qualidade prensa 2 anos 2021 e 2022.



Fonte: elaborado pelo autor.

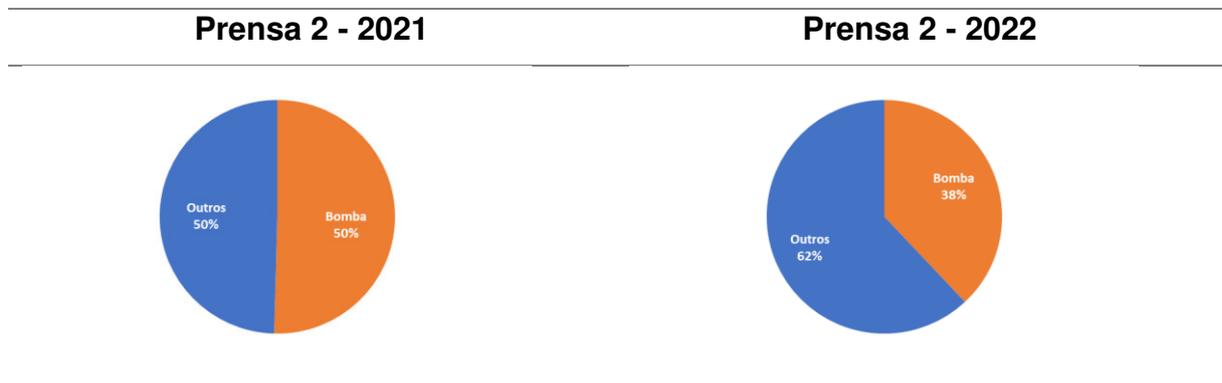
Observou-se que, embora os fatores do OEE (disponibilidade, performance e qualidade) estejam relacionados ao sistema de aquecimento das prensas, sendo a temperatura uma das principais variáveis no controle do processo, que é determinante na qualidade do revestimento das chapas e, ainda que as bombas desempenhem função crítica deste sistema, estes fatores não dependem unicamente destes equipamentos. Isto ocorre devido a máquina ser formada por diversos componentes que interagem entre si e detém modos de falha próprios, formando sistemas complexos que operam de forma simultânea. Por tratar-se de um sistema com essas características, percebe-se a importância de focar na melhoria dos principais componentes da máquina por ordem de prioridades, estabelecendo um critério de escolha, por exemplo: gargalo para melhoria da performance ou equipamentos mais indisponíveis para melhorar da disponibilidade. Para facilitar essa discussão, foram elaboradas a Figura 34 e a Figura 35. Estas figuras apresentam, de forma percentual, a indisponibilidade das bombas em 2021 e 2022 para as prensas 1 e 2, respectivamente.

Figura 34: Indisponibilidade da bomba - Prensa 1 anos 2021 e 2022



Fonte: Sistema ERP da empresa.

Figura 35: Indisponibilidade da bomba - Prensa 2 anos 2021 e 2022



Fonte: Sistema ERP da empresa.

A Figura 34 e a Figura 35 mostraram que, apesar das bombas terem reduzido sua indisponibilidade no tempo total da máquina, a bomba da prensa 1 manteve-se próximo ao resultado apresentado na comparação de 2021/2022. Neste caso, uma possível causa é que a manutenção corretiva tenha contribuído para um aumento dos tempos de reparo. Já a manutenção preventiva fez com que a bomba-2 reduzisse de 50 para 38 por cento sua indisponibilidade no tempo total, apesar de manter-se na fase de envelhecimento.

O capítulo seguinte traz as considerações finais com base na análise e discussão dos resultados apresentados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar o OEE e compará-lo à melhoria apresentadas na Figura 23, Figura 24, Figura 34 e Figura 35 nota-se que a confiabilidade da bomba, apesar de contribuir para a melhoria da disponibilidade, não é o item mais baixo do cálculo. O resultado da máquina é prejudicado pelo fator performance apresentado na Figura 30 e Figura 31. Isto vai de encontro à afirmação de Goldratt (1986) que diz “A soma dos ótimos locais não é igual ao ótimo global”. Esta afirmação não trata apenas da meta a ser alcançada, mas também questiona como determinar quais ações devem ser tomadas para alcançá-la. Neste sentido, a confiabilidade estatística pode ser uma ferramenta de apoio para melhoria do fator disponibilidade apenas.

Embora não seja possível afirmar, ao analisar a Figura 29 percebe-se uma queda de disponibilidade após a parada programada na prensa-2 em março/22, que podem ter relação com erros induzidos por manutenção, ou seja, que surgem a partir da execução de manutenção. Isto vai de encontro às afirmações de Selvik (2011) e Gao (2015) apresentadas no capítulo 2.4.

Aos bons resultados de MTTR obtidos e apresentados no capítulo anterior, pode-se atribuir: a correta seleção do modelo de distribuição de Weibull para as amostras de tempos até a falha e o empenho da equipe do departamento de engenharia de manutenção na investigação e correção dos componentes com maior número de falha, contribuíram para geração de resultados. Estudos realizados por Sellitto (2017) mostraram que ao reforçar os componentes que apresentaram maior número de falhas é possível melhorar a confiabilidade. Neste contexto, pode-se destacar a mudança do selo mecânico e do lubrificante da bomba como os componentes que reduziram as principais falhas de rolamentos e vazamentos.

A prensa-1, que encerrou o ano de 2022 com a disponibilidade levemente acima na comparação com o ano anterior, não foi seguida pela prensa-2 que sofreu quedas em seu resultado de disponibilidade após a realização de manutenção programada no mês de março daquele mesmo ano. O pesquisador conclui que essa queda nos resultados seja oriunda de falhas aleatórias de outros sistemas da máquina, não monitorados neste estudo, ou ainda pode ter a influência de erros induzidos por manutenção preventiva.

Além dos aspectos até aqui citados, também é possível apontar que com a confiabilidade promove-se, além de dados quantitativos que auxiliam a gestão na tomada de decisão, o aumento da vida útil de equipamentos na fase de mortalidade infantil. Isto previne a substituição precoce de componentes na fase em que falhas prematuras ocorrem predominantemente e antes de atingirem o tempo de uso considerado normal pelos fabricantes. Isto pode ser observado pelo aumento dos intervalos de tempo de falha apresentado nos histogramas da função densidade de probabilidade na Figura 10 e Figura 16.

Outro benefício que pode ser citado é a redução do número de horas alocadas de técnicos de manutenção para resolução de problemas relacionados às falhas de projeto ou da instalação. Desta forma, conforme os equipamentos são melhorados, pode-se obter maior aproveitamento do quadro de funcionários para atuar em outras tarefas. Esta redução é observada ao comparar o número de falhas apresentada em 2021 na Figura 9 com o número de falhas em 2022 na Figura 15.

Devido a estrutura necessária para conduzir estudos relacionados à confiabilidade, tendo como estruturas principais as pessoas capacitadas e o uso de softwares específicos para controle e tratamento dos dados, o custo total desta atividade pode ser considerado elevado para a maioria das empresas brasileiras. Contudo, essa ferramenta promete a entrega de bons resultados em longo prazo, à medida que a confiabilidade aumenta e a taxa de falhas se tornam constantes, associado à fase de maturidade.

Por último, foram identificados pela engenharia de manutenção, durante a elaboração deste trabalho, fatores operacionais que podem ter relação com o elevado número de falhas apresentadas por estas bombas. São exemplos: a ausência de instruções operacionais para a produção ao ligar e desligar o equipamento, assim como a ausência de instruções de manutenção para montagem da bomba durante o processo de reparo. Essas demandas, importantes no contexto de se evitar falhas induzidas, foram incluídas no planejamento de 2023 da empresa para o desenvolvimento e treinamento dos técnicos e operadores. O capítulo seguinte apresenta as conclusões da pesquisa.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre o uso da confiabilidade estatística como ferramenta apoio à melhoria do OEE. Segundo o objetivo de aplicar essa ferramenta para adotar estratégias de manutenção em bombas do sistema de aquecimento de prensas, visando o aumento de confiabilidade e melhoria do indicador OEE, pode-se concluir que, com base nos resultados obtidos, o objetivo geral deste trabalho foi parcialmente atingido.

Os resultados de disponibilidade, performance e qualidade (parcelas do cálculo do OEE) apresentados refletem o estado global da máquina, sendo esta, de grande complexidade e composta por diversos subsistemas. Ao se utilizar o histórico de falhas destes ativos reais, diversos aspectos foram observados, comprovando-se que, através da confiabilidade estatística, é possível determinar uma estratégia de manutenção que resulte no aumento da confiabilidade do equipamento, conforme demonstrado nos resultados apresentados na Tabela 11 e ilustrados na Figura 23 e na Figura 24. Embora estes resultados tenham representado significativa melhoria nas bombas, o mesmo efeito não pôde ser observado de forma direta no indicador de eficiência global das prensas (OEE). Logo, é questionável e duvidoso usar confiabilidade estatística para melhorar o OEE. A confiabilidade estatística pode ser utilizada para adotar a melhor estratégia de manutenção e melhorar a parcela disponibilidade do OEE. Contudo, outras ferramentas podem ser utilizadas em conjunto para tratar de paradas não relacionadas diretamente às máquinas, mas sim ao processo e ao gerenciamento operacional, os quais não foram objeto de estudo desta pesquisa.

O objetivo geral se deu ao longo dos objetivos específicos: através do fluxograma metodológico foi possível estabelecer um plano de trabalho e obter o entendimento completo dos responsáveis sobre o uso da confiabilidade estatística na manutenção de bombas. Também ficou demonstrado, através da Figura 25, a fase da vida em que as bombas analisadas se encontravam antes e após a realização do estudo. O aumento da confiabilidade, mostrado na Figura 23 e na Figura 24, seguido da melhoria do MTTR das bombas em até 84,25%, permitiu a redução do número de

falhas recorrentes nestes equipamentos e também demonstrou os benefícios em gerenciar esses ativos de alta criticidade através do uso da confiabilidade estatística.

8. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Em virtude dos resultados deste trabalho, mostrados nos capítulos anteriores, e do conhecimento obtido na elaboração do mesmo, o autor sugere pesquisas relacionadas ao tema que abordem os seguintes assuntos:

- O estudo da confiabilidade e estratégias de manutenção em máquinas complexas com monitoramento de diversos sistemas críticos com grande peso no cálculo da disponibilidade;

Um estudo neste modelo pode ser elaborado por meio de grupos de trabalho que monitorem diversos sistemas, relacionando diretamente as alterações das estratégias de manutenção com a disponibilidade, fator do OEE.

- A viabilidade de software com base no modelo matemático de Weibull e de controle automático dos tempos até a falha para indicação da melhor estratégia de manutenção a ser adotada em máquinas rotativas;

Embora o *ProConf@* seja um software excelente para estudos relacionados à confiabilidade, sugere-se aqui o estudo de viabilidade de um software que integre o gerenciamento e controle da manutenção com a confiabilidade estatística e recomende automaticamente a melhor estratégia de acordo com a fase da vida na qual o equipamento está situado.

- Realizar o estudo da confiabilidade em máquinas de menor complexidade onde a disponibilidade possa ser avaliada de forma proporcional a confiabilidade dos equipamentos;

É possível que em máquinas menos complexas a disponibilidade responda de forma proporcional à medida que a confiabilidade aumenta ou diminui, impactando o cálculo do OEE.

- Verificação de falhas induzidas por manutenção por meio do controle da confiabilidade estatística.

Nesta avaliação, sugere-se analisar o possível surgimento de falhas após a execução da manutenção preventiva, podendo-se apontar o efeito no resultado de confiabilidade do equipamento e no OEE da máquina.

9. REFERÊNCIAS

9.1 Referências Nominais

ABBAS, Muntazir; SHAFIEE, Mahmood. An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments. **Marine Structures**, Percentil Scopus: 92%, v. 71, p. 102718, 2020.

HOUSHYAR, A. Reliability and maintainability of machinery and equipment, part 2: benchmarking, life-cycle cost, and predictive maintenance. **International Journal of Modelling and Simulation**, Percentil Scopus: 88%, v. 25, n. 1, p. 1-11, 2005.

BIANCHINI, Augusto; PELLEGRINI, Marco; ROSSI, Jessica. Maintenance scheduling optimization for industrial centrifugal pumps. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, v. 10, n. 4, p. 848-860, 2019.

BRENEMAN, James E.; SAHAY, Chittaranjan; LEWIS, Elmer E. Introduction to reliability engineering. John Wiley & Sons, 2022.

BURDICK, G. R. et al. Phased mission analysis: a review of new developments and an application. **IEEE Transactions on Reliability**, Percentil Scopus: 95%, v. 26, n. 1, p. 43-49, 1977.

CHIKWENDU, Okpala Charles; CHIMA, Anozie Stephen; EDITH, Mgbemena Chika. The optimization of overall equipment effectiveness factors in a pharmaceutical company. **Heliyon**, Percentil Scopus: 82%, v. 6, n. 4, p. e03796, 2020.

DIALLO, Mohamadou; PIERREVAL, Henri; QUILLIOT, Alain. Manufacturing cells design with flexible routing capability in presence of unreliable machines. **International Journal of Production Economics**, Percentil Scopus: 98% v. 74, n. 1-3, p. 175-182, 2001.

DODSON, B.; NOLAN, D. Reliability engineering handbook. New York: Marcel Dekker, 2002.

ELSAYED, E.A. Reliability Engineering. Nova York: Prentice-Hall, 1996.

FOGLIATTO, F.; RIBEIRO, J. Confiabilidade e manutenção industrial. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011.

FRASER, Kym; HVOLBY, Hans-Henrik; TSENG, Tzu-Liang Bill. Maintenance management models: a study of the published literature to identify empirical evidence: A greater practical focus is needed. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Percentil Scopus: 83%, v. 32 n. 6, p. 635-664, 2015.

GAO, Robert *et al.* Cloud-enabled prognosis for manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Percentil Scopus: 93%, v. 64, n. 2, p. 749-772, 2015.

GEORGIEV, Anton Slavchev; VASILEV, Rosen Nikolov. Comparison of Some Variants of Emergency Maintenance Strategy. In: 2020 7th **International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)**. IEEE, 2020. p. 1-4.

GOLDRATT, Eliyhau M.& COX Jeff. A Meta. IMAM. São Paulo, 1986.

GOOSSENS, Adriaan JM; BASTEN, Rob JI. Exploring maintenance policy selection using the Analytic Hierarchy Process; an application for naval ships. **Reliability Engineering & System Safety**, Percentil Scopus: 97%, v. 142, p. 31-41, 2015.

IRESON, W.; COOMBS, C.; MOSS, R. Handbook of reliability engineering and management. New York: McGray-Hill, 1996.

KIANGALA, Kahiomba Sonia; WANG, Zenghui. Initiating predictive maintenance for a conveyor motor in a bottling plant using industry 4.0 concepts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Percentil Scopus: 84%, v. 97, n. 9, p. 3251-3271, 2018.

LEEMIS, Lawrence M. Reliability: probabilistic models and statistical methods. Prentice-Hall, Inc., 1995.

MACCHI, Marco *et al.* Maintenance management of railway infrastructures based on reliability analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, Percentil Scopus: 97%, v. 104, p. 71-83, 2012.

MATTHEWS, John C.; PIRATLA, Kalyan; KOO, Dan D. Sustainability evaluation of pipe asset management strategies. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 483-490, 2016.

MENGUE, Denis Carlos; SELLITTO, Miguel Afonso. Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. **Revista Produção Online**, v. 13, n. 2, p. 759-783, 2013.

MOUBRAY, J. Introdução à manutenção centrada na confiabilidade. São Paulo: Aladon, 1996.

NAKAJIMA, S., Introduction to TPM, Productivity Press, Cambridge, MA, 1988.

PHAM, Hoang; WANG, Hongzhou. Imperfect maintenance. **European journal of operational research**, Percentil Scopus: 97%, v. 94, n. 3, p. 425-438, 1996.

RAUSAND, Marvin; HOYLAND, A. Component importance. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications, vol. 396, John Wiley & Sons, 2004.

SELLITTO, Miguel Afonso; BRUSIUS, W. Maintenance strategy based on reliability analytical models for three parallel mechanical transformation machines. **IEEE Latin America Transactions**, Percentil Scopus: 50%, v. 15, n. 5, p. 988-993, 2017.

SELVIK, J.T.; SCARF, P.; AVEN, Terje. An extended methodology for risk based inspection planning. **Reliability: Theory & Applications**, Percentil Scopus: 12%, v. 6, n. 1 (20), p. 115-126, 2011.

SOUZA, Marcos Leandro Hoffmann *et al.* A survey on decision-making based on system reliability in the context of Industry 4.0. **Journal of Manufacturing Systems**, Percentil Scopus: 97%, v. 56, p. 133-156, 2020.

TSAROUHAS, Panagiotis. Improving operation of the croissant production line through overall equipment effectiveness (OEE): A case study. **International journal of productivity and performance management**, Percentil Scopus: 82%, v. 68, n. 1, p. 88-108, 2019.

WANG, Fu-Kwun. Evaluating the efficiency of implementing total productive maintenance. **Total Quality Management & Business Excellence**, Percentil Scopus: 91%, v. 17, n. 5, p. 655-667, 2006.

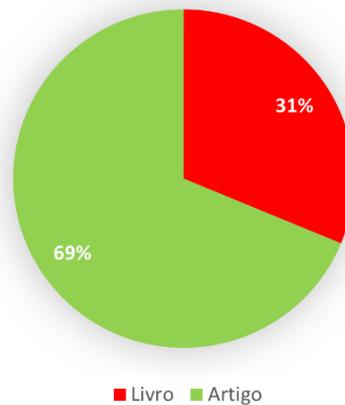
WUDHIKARN, R., "Implementation of the overall equipment cost loss (OECL) methodology for comparison with overall equipment effectiveness (OEE)", **Journal of**

Quality in Maintenance Engineering, Percentil Scopus: 54%, v. 22 n. 1, p. 81-93, 2016.

ZAKIKHANI, Kimiya; NASIRI, Fuzhan; ZAYED, Tarek. Availability-based reliability-centered maintenance planning for gas transmission pipelines. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Percentil Scopus: 65%, v. 183, p. 104105, 2020.

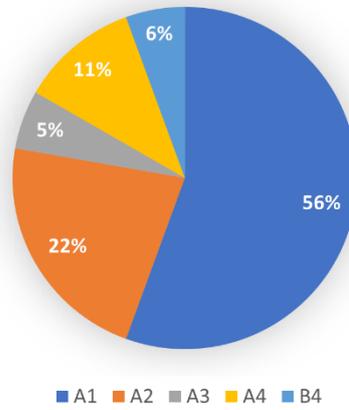
9.2 Referências por Estrato

Distribuição Bibliográfica por Estrato



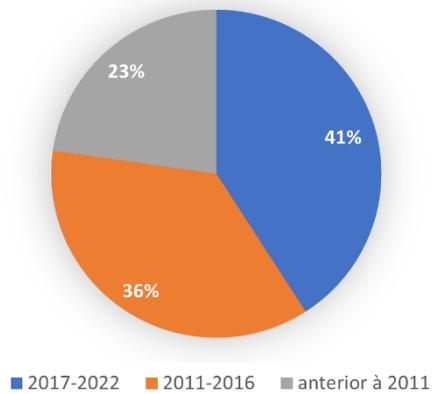
9.3 Referências por Qualis

Distribuição dos Artigos por Qualis



9.4 Referências por Data dos Artigos

Distribuição por Data dos Artigos



ANEXOS

ANEXO A – Cartilha técnica de análise de falha em rolamentos

ANÁLISE DE FALHAS EM ROLAMENTOS

TIMKEN

<p>MATERIAIS ESTRANHOS</p> <p>Causas típicas incluem métodos de limpeza inadequados, filtragem de óleo incorreta ou obstrução de retenções que podem gerar deslocamentos PSO (Origem de ponto superficial).</p>						
<p>CORROSÃO/ATAQUE QUÍMICO</p> <p>Causas típicas incluem embalagem danificada, armazenamento inadequado e retentores desgastados ou danificados.</p>						
<p>LUBRIFICAÇÃO INADEQUADA</p> <p>Causas típicas incluem graxa ou viscosidade de óleo inadequados, baixa vazão de lubrificante, película fina de lubrificante por cargas altas/baixa RPM ou altas temperaturas de operação.</p>						
<p>PRÉ-CARGA E SOBRECARGA EXCESSIVAS</p> <p>Causas típicas incluem alta carga, desalinhamento e concentração de tensão.</p>						
<p>DESALINHAMENTO</p> <p>Causas típicas incluem carga alta, deflexão do eixo ou mancal, usinagem incorreta do mancal ou eixo ou desalinhamento durante a configuração da máquina.</p>						
<p>DANOS DE MANUSEIO</p> <p>Causas típicas incluem seleção de ferramentas inadequadas (elementos de acionamento temperados) e práticas de manuseio importantes que podem gerar deslocamentos PSO (Origem de ponto superficial).</p>						
<p>DANOS NO PORTA-ROLLOS</p> <p>Causas típicas incluem manuseio inadequado, ferramentas de instalação inadequadas ou procedimentos de instalação inadequados.</p>						
<p>PRÁTICAS DE AJUSTE INADEQUADAS NO MANCAL OU EIXO</p> <p>Causas típicas incluem tamanho errado e forma incorreta, aumento da tensão no eixo ou mancal e usinagens inadequadas.</p>						
<p>DANOS POR BRINELL E IMPACTO</p> <p>Causas típicas incluem manuseio incorreto e cargas de choque que excedem os limites do material.</p>						
<p>FALSO BRINELL</p> <p>Causas típicas incluem vibração excessiva durante o transporte ou quando o eixo é estacionário.</p>						
<p>PONTOS ALTOS NO MANCAL</p> <p>Causas típicas incluem métodos inadequados de usinagem, retificação ou reparo.</p>						
<p>QUEIMADURAS POR CORRENTE ELÉTRICA</p> <p>Causas típicas incluem aterramento elétrico inadequado dos equipamentos, danos por soldagem ou descarga estática.</p>						
<p>DESGASTE ADESIVO</p> <p>Causas típicas incluem película do óleo inadequada, excesso de atrito no porta-rollos e desalinhamento excessivo do rollo.</p>						
<p>FOLGA LATERAL EXCESSIVA</p> <p>Causas típicas incluem ajustagem inadequada que gera folga excessiva e pequena zona de carga de operação.</p>						

PARA SABER MAIS SOBRE CADA MODO DE FALHA, ENTRE EM CONTATO COM UM REPRESENTANTE LOCAL VENDAS OU SERVIÇO DA TIMKEN.

ADVERTÊNCIA

Não abra o rolamento e não tente reparar sem estar devidamente treinado para isso. Nunca abra o rolamento para reparo sem estar devidamente treinado para isso. Nunca abra o rolamento para reparo sem estar devidamente treinado para isso. Sempre use equipamentos de proteção pessoal e de segurança.

CUIDADO

Não toque nos olhos e não respire o pó. Não toque nos olhos e não respire o pó. Não toque nos olhos e não respire o pó. Não toque nos olhos e não respire o pó.

Stronger. By Design.

ANEXO B – Ficha técnica do lubrificante

Sapphire Hi-Temp 2



TECHNICAL DATA

SAPPHIRE HI-TEMP 2

High Temperature Grease

Description

ROCOL Sapphire Hi-Temp 2 is a bearing grease designed for the effective lubrication and protection of all types of ball, roller and plain bearings at elevated temperatures.

Outstanding Features

- Excellent high temperature performance
- Resists carbonisation at high temperatures
- Extends lubrication intervals
- Excellent corrosion protection

Directions for use

ROCOL Sapphire Hi-Temp 2 can be applied manually or by a suitable applicator, eg. ROCOL Grease Gun. ROCOL Sapphire Hi-Temp 2 is compatible with other soap-thickened greases. However, for best results, bearings should be cleaned or purged of the previous lubricant.

Technical Data (typical figures)

<i>Appearance</i>	: Smooth, beige grease
<i>NLGI No. (IP 50)(ASTM D217)</i>	: NLGI No. 2
<i>Base fluid type</i>	: Synthetic Hydrocarbon oil
<i>Thickener</i>	: Lithium Complex
<i>Temperature range (ASTM D128)</i>	: -40°C to +200°C (200°C short lubrication periods)
<i>Shell 4 Ball (IP 239) (ASTM D2596)</i>	
<i>Weld Load</i>	: 355kg
<i>Mean Hertz Load</i>	: 68kg
<i>Copper Corrosion Test (IP112) (ASTM D130)</i>	: 1b
<i>Evaporation Loss (IP183) (ASTM D972) 175°C</i>	: 4.1%
<i>Storage</i>	: Store in a cool/dry place

APÊNDICE

APÊNDICE A - Resultado das funções de confiabilidade: bomba-1 ano 2021

	<i>Tempo</i>	<i>Confiabilidade</i>	<i>Densidade Acumulada de Falha</i>	<i>Densidade de Probabilidade</i>	<i>Taxa de Falha</i>
1	0	1	0	0,0098	0,0098
2	18,7841	0,8274	0,1726	0,0072	0,0086
3	37,5683	0,7312	0,2688	0,0045	0,0062
4	56,3524	0,657	0,343	0,0036	0,0055
5	75,1366	0,596	0,404	0,003	0,005
6	93,9207	0,5443	0,4557	0,0026	0,0047
7	112,7048	0,4994	0,5006	0,0022	0,0045
8	131,489	0,4601	0,5399	0,002	0,0043
9	150,2731	0,4252	0,5748	0,0018	0,0041
10	169,0573	0,3939	0,6061	0,0016	0,004
11	187,8414	0,3659	0,6341	0,0014	0,0039
12	206,6255	0,3405	0,6595	0,0013	0,0038
13	225,4097	0,3174	0,6826	0,0012	0,0037
14	244,1938	0,2964	0,7036	0,0011	0,0036
15	262,978	0,2771	0,7229	9,82E-04	0,0035
16	281,7621	0,2595	0,7405	9,02E-04	0,0035
17	300,5462	0,2432	0,7568	8,31E-04	0,0034
18	319,3304	0,2283	0,7717	7,67E-04	0,0034
19	338,1145	0,2145	0,7855	7,09E-04	0,0033
20	356,8987	0,2017	0,7983	6,57E-04	0,0033
21	375,6828	0,1898	0,8102	6,09E-04	0,0032
22	394,467	0,1788	0,8212	5,66E-04	0,0032
23	413,2511	0,1685	0,8315	5,27E-04	0,0031
24	432,0352	0,159	0,841	4,91E-04	0,0031
25	450,8194	0,1501	0,8499	4,58E-04	0,0031
26	469,6035	0,1418	0,8582	4,28E-04	0,003
27	488,3877	0,134	0,866	4,00E-04	0,003
28	507,1718	0,1267	0,8733	3,75E-04	0,003
29	525,9559	0,1199	0,8801	3,51E-04	0,0029
30	544,7401	0,1135	0,8865	3,29E-04	0,0029
31	563,5242	0,1076	0,8924	3,09E-04	0,0029
32	582,3084	0,1019	0,8981	2,90E-04	0,0028
33	601,0925	0,0967	0,9033	2,73E-04	0,0028
34	619,8766	0,0917	0,9083	2,56E-04	0,0028

35	638,6608	0,087	0,913	2,41E-04	0,0028
36	657,4449	0,0826	0,9174	2,27E-04	0,0028
37	676,2291	0,0785	0,9215	2,14E-04	0,0027
38	695,0132	0,0746	0,9254	2,02E-04	0,0027
39	713,7973	0,0709	0,9291	1,91E-04	0,0027
40	732,5815	0,0674	0,9326	1,80E-04	0,0027
41	751,3656	0,0641	0,9359	1,70E-04	0,0027
42	770,1498	0,061	0,939	1,61E-04	0,0026
43	788,9339	0,0581	0,9419	1,52E-04	0,0026
44	807,718	0,0553	0,9447	1,44E-04	0,0026
45	826,5022	0,0527	0,9473	1,36E-04	0,0026
46	845,2863	0,0502	0,9498	1,29E-04	0,0026
47	864,0705	0,0479	0,9521	1,22E-04	0,0026
48	882,8546	0,0456	0,9544	1,16E-04	0,0025
49	901,6387	0,0435	0,9565	1,10E-04	0,0025
50	920,4229	0,0415	0,9585	1,04E-04	0,0025
51	939,207	0,0396	0,9604	9,87E-05	0,0025
52	957,9912	0,0378	0,9622	9,37E-05	0,0025
53	976,7753	0,0361	0,9639	8,90E-05	0,0025
54	995,5594	0,0344	0,9656	8,45E-05	0,0025
55	1014,344	0,0329	0,9671	8,03E-05	0,0024
56	1033,128	0,0314	0,9686	7,63E-05	0,0024
57	1051,912	0,03	0,97	7,26E-05	0,0024
58	1070,696	0,0287	0,9713	6,90E-05	0,0024
59	1089,48	0,0274	0,9726	6,57E-05	0,0024
60	1108,264	0,0262	0,9738	6,25E-05	0,0024
61	1127,048	0,0251	0,9749	5,95E-05	0,0024
62	1145,833	0,024	0,976	5,67E-05	0,0024
63	1164,617	0,023	0,977	5,40E-05	0,0024
64	1183,401	0,022	0,978	5,14E-05	0,0023
65	1202,185	0,021	0,979	4,90E-05	0,0023
66	1220,969	0,0201	0,9799	4,67E-05	0,0023
67	1239,753	0,0193	0,9807	4,45E-05	0,0023
68	1258,537	0,0185	0,9815	4,25E-05	0,0023
69	1277,322	0,0177	0,9823	4,05E-05	0,0023
70	1296,106	0,0169	0,9831	3,86E-05	0,0023
71	1314,89	0,0162	0,9838	3,69E-05	0,0023
72	1333,674	0,0156	0,9844	3,52E-05	0,0023
73	1352,458	0,0149	0,9851	3,36E-05	0,0023
74	1371,242	0,0143	0,9857	3,21E-05	0,0022
75	1390,026	0,0137	0,9863	3,07E-05	0,0022
76	1408,811	0,0131	0,9869	2,93E-05	0,0022
77	1427,595	0,0126	0,9874	2,80E-05	0,0022
78	1446,379	0,0121	0,9879	2,68E-05	0,0022

79	1465,163	0,0116	0,9884	2,56E-05	0,0022
80	1483,947	0,0111	0,9889	2,45E-05	0,0022
81	1502,731	0,0107	0,9893	2,34E-05	0,0022
82	1521,515	0,0102	0,9898	2,24E-05	0,0022
83	1540,3	0,0098	0,9902	2,14E-05	0,0022
84	1559,084	0,0094	0,9906	2,05E-05	0,0022
85	1577,868	0,0091	0,9909	1,96E-05	0,0022
86	1596,652	0,0087	0,9913	1,88E-05	0,0022
87	1615,436	0,0084	0,9916	1,80E-05	0,0021
88	1634,22	0,008	0,992	1,72E-05	0,0021
89	1653,004	0,0077	0,9923	1,65E-05	0,0021
90	1671,789	0,0074	0,9926	1,58E-05	0,0021
91	1690,573	0,0071	0,9929	1,51E-05	0,0021
92	1709,357	0,0068	0,9932	1,45E-05	0,0021
93	1728,141	0,0066	0,9934	1,39E-05	0,0021
94	1746,925	0,0063	0,9937	1,33E-05	0,0021
95	1765,709	0,0061	0,9939	1,27E-05	0,0021
96	1784,493	0,0058	0,9942	1,22E-05	0,0021
97	1803,277	0,0056	0,9944	1,17E-05	0,0021
98	1822,062	0,0054	0,9946	1,12E-05	0,0021
99	1840,846	0,0052	0,9948	1,08E-05	0,0021
100	1859,63	0,005	0,995	1,03E-05	0,0021

APÊNDICE B - Resultado das funções de confiabilidade: bomba-1 ano 2022

	<i>Tempo</i>	<i>Confiabilidade</i>	<i>Densidade Acumulada de Falha</i>	<i>Densidade de Probabilidade</i>	<i>Taxa de Falha</i>
1	0	1	0	1,74E-05	1,74E-05
2	11,0609	0,9991	8,79E-04	1,47E-04	1,48E-04
3	22,1217	0,9967	0,0033	2,78E-04	2,78E-04
4	33,1826	0,993	0,007	3,98E-04	4,01E-04
5	44,2434	0,9879	0,0121	5,13E-04	5,19E-04
6	55,3043	0,9816	0,0184	6,22E-04	6,34E-04
7	66,3651	0,9742	0,0258	7,27E-04	7,47E-04
8	77,426	0,9655	0,0345	8,27E-04	8,57E-04
9	88,4869	0,9559	0,0441	9,23E-04	9,66E-04
10	99,5477	0,9451	0,0549	0,001	0,0011
11	110,6086	0,9334	0,0666	0,0011	0,0012
12	121,6694	0,9208	0,0792	0,0012	0,0013
13	132,7303	0,9073	0,0927	0,0013	0,0014
14	143,7911	0,8929	0,1071	0,0013	0,0015
15	154,852	0,8778	0,1222	0,0014	0,0016
16	165,9128	0,862	0,138	0,0015	0,0017
17	176,9737	0,8455	0,1545	0,0015	0,0018
18	188,0346	0,8284	0,1716	0,0016	0,0019
19	199,0954	0,8108	0,1892	0,0016	0,002
20	210,1563	0,7926	0,2074	0,0017	0,0021
21	221,2171	0,7741	0,2259	0,0017	0,0022
22	232,278	0,7551	0,2449	0,0017	0,0023
23	243,3388	0,7358	0,2642	0,0018	0,0024
24	254,3997	0,7162	0,2838	0,0018	0,0025
25	265,4606	0,6964	0,3036	0,0018	0,0026
26	276,5214	0,6765	0,3235	0,0018	0,0027
27	287,5823	0,6564	0,3436	0,0018	0,0028
28	298,6431	0,6362	0,3638	0,0018	0,0029
29	309,704	0,616	0,384	0,0018	0,003
30	320,7648	0,5959	0,4041	0,0018	0,0031
31	331,8257	0,5758	0,4242	0,0018	0,0032
32	342,8866	0,5558	0,4442	0,0018	0,0032
33	353,9474	0,5359	0,4641	0,0018	0,0033
34	365,0083	0,5162	0,4838	0,0018	0,0034
35	376,0691	0,4967	0,5033	0,0018	0,0035
36	387,13	0,4775	0,5225	0,0017	0,0036
37	398,1908	0,4585	0,5415	0,0017	0,0037

38	409,2517	0,4399	0,5601	0,0017	0,0038
39	420,3126	0,4215	0,5785	0,0016	0,0039
40	431,3734	0,4036	0,5964	0,0016	0,004
41	442,4343	0,386	0,614	0,0016	0,0041
42	453,4951	0,3688	0,6312	0,0015	0,0042
43	464,556	0,352	0,648	0,0015	0,0043
44	475,6168	0,3356	0,6644	0,0015	0,0043
45	486,6777	0,3197	0,6803	0,0014	0,0044
46	497,7385	0,3042	0,6958	0,0014	0,0045
47	508,7994	0,2892	0,7108	0,0013	0,0046
48	519,8603	0,2747	0,7253	0,0013	0,0047
49	530,9211	0,2606	0,7394	0,0013	0,0048
50	541,982	0,247	0,753	0,0012	0,0049
51	553,0428	0,2339	0,7661	0,0012	0,005
52	564,1037	0,2213	0,7787	0,0011	0,0051
53	575,1645	0,2091	0,7909	0,0011	0,0052
54	586,2254	0,1974	0,8026	0,001	0,0052
55	597,2863	0,1862	0,8138	9,93E-04	0,0053
56	608,3471	0,1755	0,8245	9,51E-04	0,0054
57	619,408	0,1652	0,8348	9,10E-04	0,0055
58	630,4688	0,1554	0,8446	8,69E-04	0,0056
59	641,5297	0,146	0,854	8,29E-04	0,0057
60	652,5905	0,137	0,863	7,91E-04	0,0058
61	663,6514	0,1285	0,8715	7,53E-04	0,0059
62	674,7123	0,1204	0,8796	7,16E-04	0,0059
63	685,7731	0,1126	0,8874	6,80E-04	0,006
64	696,834	0,1053	0,8947	6,45E-04	0,0061
65	707,8948	0,0984	0,9016	6,11E-04	0,0062
66	718,9557	0,0918	0,9082	5,78E-04	0,0063
67	730,0165	0,0856	0,9144	5,46E-04	0,0064
68	741,0774	0,0797	0,9203	5,16E-04	0,0065
69	752,1383	0,0742	0,9258	4,86E-04	0,0066
70	763,1991	0,069	0,931	4,58E-04	0,0066
71	774,26	0,0641	0,9359	4,31E-04	0,0067
72	785,3208	0,0594	0,9406	4,05E-04	0,0068
73	796,3817	0,0551	0,9449	3,80E-04	0,0069
74	807,4425	0,051	0,949	3,56E-04	0,007
75	818,5034	0,0472	0,9528	3,34E-04	0,0071
76	829,5642	0,0437	0,9563	3,12E-04	0,0072
77	840,6251	0,0403	0,9597	2,92E-04	0,0072
78	851,686	0,0372	0,9628	2,72E-04	0,0073
79	862,7468	0,0343	0,9657	2,54E-04	0,0074
80	873,8077	0,0316	0,9684	2,37E-04	0,0075
81	884,8685	0,0291	0,9709	2,20E-04	0,0076

82	895,9294	0,0267	0,9733	2,05E-04	0,0077
83	906,9902	0,0245	0,9755	1,90E-04	0,0077
84	918,0511	0,0225	0,9775	1,76E-04	0,0078
85	929,112	0,0206	0,9794	1,63E-04	0,0079
86	940,1728	0,0189	0,9811	1,51E-04	0,008
87	951,2337	0,0173	0,9827	1,40E-04	0,0081
88	962,2945	0,0158	0,9842	1,29E-04	0,0082
89	973,3554	0,0144	0,9856	1,19E-04	0,0083
90	984,4162	0,0132	0,9868	1,10E-04	0,0083
91	995,4771	0,012	0,988	1,01E-04	0,0084
92	1006,538	0,0109	0,9891	9,30E-05	0,0085
93	1017,599	0,0099	0,9901	8,54E-05	0,0086
94	1028,66	0,009	0,991	7,84E-05	0,0087
95	1039,721	0,0082	0,9918	7,19E-05	0,0088
96	1050,781	0,0074	0,9926	6,58E-05	0,0088
97	1061,842	0,0067	0,9933	6,02E-05	0,0089
98	1072,903	0,0061	0,9939	5,51E-05	0,009
99	1083,964	0,0055	0,9945	5,03E-05	0,0091
100	1095,025	0,005	0,995	4,55E-05	0,0092

APÊNDICE C - Resultado das funções de confiabilidade: bomba-2 ano 2021

	<i>Tempo</i>	<i>Confiabilidade</i>	<i>Densidade Acumulada de Falha</i>	<i>Densidade de Probabilidade</i>	<i>Taxa de Falha</i>
1	0	1	0	0,0053	0,0053
2	5,2448	0,9718	0,0282	0,0058	0,006
3	10,4895	0,939	0,061	0,0064	0,0068
4	15,7343	0,9051	0,0949	0,0065	0,0072
5	20,9791	0,8709	0,1291	0,0065	0,0075
6	26,2239	0,8368	0,1632	0,0065	0,0077
7	31,4686	0,8032	0,1968	0,0064	0,0079
8	36,7134	0,7702	0,2298	0,0062	0,0081
9	41,9582	0,7379	0,2621	0,0061	0,0082
10	47,2029	0,7065	0,2935	0,0059	0,0084
11	52,4477	0,676	0,324	0,0057	0,0085
12	57,6925	0,6464	0,3536	0,0056	0,0086
13	62,9373	0,6177	0,3823	0,0054	0,0087
14	68,182	0,59	0,41	0,0052	0,0088
15	73,4268	0,5633	0,4367	0,005	0,0089
16	78,6716	0,5375	0,4625	0,0048	0,009
17	83,9163	0,5127	0,4873	0,0046	0,009
18	89,1611	0,4889	0,5111	0,0045	0,0091
19	94,4059	0,466	0,534	0,0043	0,0092
20	99,6507	0,4439	0,5561	0,0041	0,0093
21	104,8954	0,4228	0,5772	0,0039	0,0093
22	110,1402	0,4026	0,5974	0,0038	0,0094
23	115,385	0,3832	0,6168	0,0036	0,0094
24	120,6297	0,3646	0,6354	0,0035	0,0095
25	125,8745	0,3468	0,6532	0,0033	0,0096
26	131,1193	0,3298	0,6702	0,0032	0,0096
27	136,3641	0,3136	0,6864	0,003	0,0097
28	141,6088	0,298	0,702	0,0029	0,0097
29	146,8536	0,2832	0,7168	0,0028	0,0098
30	152,0984	0,269	0,731	0,0026	0,0098
31	157,3432	0,2555	0,7445	0,0025	0,0099
32	162,5879	0,2426	0,7574	0,0024	0,0099
33	167,8327	0,2303	0,7697	0,0023	0,0099
34	173,0775	0,2186	0,7814	0,0022	0,01
35	178,3222	0,2074	0,7926	0,0021	0,01
36	183,567	0,1968	0,8032	0,002	0,0101
37	188,8118	0,1866	0,8134	0,0019	0,0101

38	194,0566	0,177	0,823	0,0018	0,0101
39	199,3013	0,1678	0,8322	0,0017	0,0102
40	204,5461	0,1591	0,8409	0,0016	0,0102
41	209,7909	0,1508	0,8492	0,0015	0,0103
42	215,0356	0,1429	0,8571	0,0015	0,0103
43	220,2804	0,1353	0,8647	0,0014	0,0103
44	225,5252	0,1282	0,8718	0,0013	0,0104
45	230,77	0,1214	0,8786	0,0013	0,0104
46	236,0147	0,115	0,885	0,0012	0,0104
47	241,2595	0,1089	0,8911	0,0011	0,0104
48	246,5043	0,103	0,897	0,0011	0,0105
49	251,749	0,0975	0,9025	0,001	0,0105
50	256,9938	0,0923	0,9077	9,73E-04	0,0105
51	262,2386	0,0873	0,9127	9,23E-04	0,0106
52	267,4834	0,0826	0,9174	8,75E-04	0,0106
53	272,7281	0,0781	0,9219	8,30E-04	0,0106
54	277,9729	0,0739	0,9261	7,87E-04	0,0107
55	283,2177	0,0699	0,9301	7,46E-04	0,0107
56	288,4624	0,0661	0,9339	7,07E-04	0,0107
57	293,7072	0,0625	0,9375	6,70E-04	0,0107
58	298,952	0,059	0,941	6,35E-04	0,0108
59	304,1968	0,0558	0,9442	6,02E-04	0,0108
60	309,4415	0,0527	0,9473	5,70E-04	0,0108
61	314,6863	0,0498	0,9502	5,40E-04	0,0108
62	319,9311	0,0471	0,9529	5,11E-04	0,0109
63	325,1758	0,0445	0,9555	4,84E-04	0,0109
64	330,4206	0,042	0,958	4,58E-04	0,0109
65	335,6654	0,0397	0,9603	4,33E-04	0,0109
66	340,9102	0,0374	0,9626	4,10E-04	0,011
67	346,1549	0,0354	0,9646	3,88E-04	0,011
68	351,3997	0,0334	0,9666	3,67E-04	0,011
69	356,6445	0,0315	0,9685	3,47E-04	0,011
70	361,8892	0,0297	0,9703	3,28E-04	0,011
71	367,134	0,0281	0,9719	3,10E-04	0,0111
72	372,3788	0,0265	0,9735	2,94E-04	0,0111
73	377,6236	0,025	0,975	2,77E-04	0,0111
74	382,8683	0,0236	0,9764	2,62E-04	0,0111
75	388,1131	0,0222	0,9778	2,48E-04	0,0111
76	393,3579	0,021	0,979	2,34E-04	0,0112
77	398,6026	0,0198	0,9802	2,21E-04	0,0112
78	403,8474	0,0186	0,9814	2,09E-04	0,0112
79	409,0922	0,0176	0,9824	1,97E-04	0,0112
80	414,337	0,0166	0,9834	1,86E-04	0,0112
81	419,5817	0,0156	0,9844	1,76E-04	0,0113

82	424,8265	0,0147	0,9853	1,66E-04	0,0113
83	430,0713	0,0139	0,9861	1,57E-04	0,0113
84	435,3161	0,0131	0,9869	1,48E-04	0,0113
85	440,5608	0,0123	0,9877	1,40E-04	0,0113
86	445,8056	0,0116	0,9884	1,32E-04	0,0114
87	451,0504	0,0109	0,9891	1,25E-04	0,0114
88	456,2951	0,0103	0,9897	1,17E-04	0,0114
89	461,5399	0,0097	0,9903	1,11E-04	0,0114
90	466,7847	0,0091	0,9909	1,05E-04	0,0114
91	472,0295	0,0086	0,9914	9,86E-05	0,0115
92	477,2742	0,0081	0,9919	9,30E-05	0,0115
93	482,519	0,0076	0,9924	8,77E-05	0,0115
94	487,7638	0,0072	0,9928	8,27E-05	0,0115
95	493,0085	0,0068	0,9932	7,80E-05	0,0115
96	498,2533	0,0064	0,9936	7,35E-05	0,0115
97	503,4981	0,006	0,994	6,93E-05	0,0116
98	508,7429	0,0056	0,9944	6,53E-05	0,0116
99	513,9876	0,0053	0,9947	6,16E-05	0,0116
100	519,2324	0,005	0,995	5,78E-05	0,0116

APÊNDICE D - Resultado das funções de confiabilidade: bomba-2 ano 2022

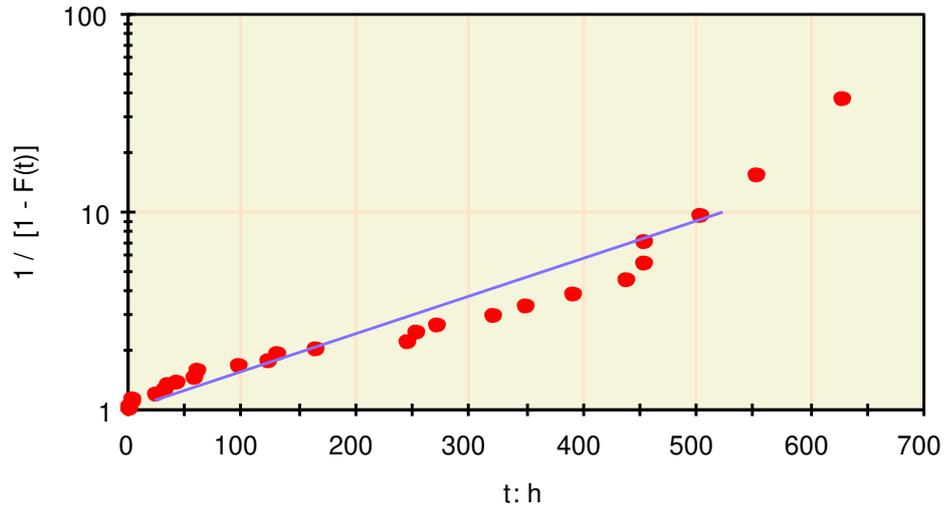
	<i>Tempo</i>	<i>Confiabilidade</i>	<i>Densidade Acumulada de Falha</i>	<i>Densidade de Probabilidade</i>	<i>Taxa de Falha</i>
1	0	1	0	4,03E-04	4,03E-04
2	6,8857	0,996	0,004	8,63E-04	8,67E-04
3	13,7713	0,9881	0,0119	0,0013	0,0013
4	20,657	0,9777	0,0223	0,0017	0,0017
5	27,5426	0,9653	0,0347	0,0019	0,002
6	34,4283	0,9512	0,0488	0,0022	0,0023
7	41,3139	0,9357	0,0643	0,0023	0,0025
8	48,1996	0,9189	0,0811	0,0025	0,0027
9	55,0853	0,901	0,099	0,0027	0,003
10	61,9709	0,8823	0,1177	0,0028	0,0032
11	68,8566	0,8627	0,1373	0,0029	0,0033
12	75,7422	0,8425	0,1575	0,003	0,0035
13	82,6279	0,8218	0,1782	0,003	0,0037
14	89,5136	0,8006	0,1994	0,0031	0,0039
15	96,3992	0,779	0,221	0,0031	0,004
16	103,2849	0,7572	0,2428	0,0032	0,0042
17	110,1705	0,7352	0,2648	0,0032	0,0044
18	117,0562	0,7131	0,2869	0,0032	0,0045
19	123,9418	0,6909	0,3091	0,0032	0,0047
20	130,8275	0,6687	0,3313	0,0032	0,0048
21	137,7132	0,6467	0,3533	0,0032	0,0049
22	144,5988	0,6247	0,3753	0,0032	0,0051
23	151,4845	0,603	0,397	0,0031	0,0052
24	158,3701	0,5814	0,4186	0,0031	0,0053
25	165,2558	0,5602	0,4398	0,0031	0,0055
26	172,1414	0,5392	0,4608	0,003	0,0056
27	179,0271	0,5186	0,4814	0,003	0,0057
28	185,9128	0,4983	0,5017	0,0029	0,0058
29	192,7984	0,4784	0,5216	0,0029	0,006
30	199,6841	0,459	0,541	0,0028	0,0061
31	206,5697	0,4399	0,5601	0,0027	0,0062
32	213,4554	0,4214	0,5786	0,0027	0,0063
33	220,341	0,4033	0,5967	0,0026	0,0064
34	227,2267	0,3856	0,6144	0,0025	0,0065
35	234,1124	0,3685	0,6315	0,0025	0,0067
36	240,998	0,3518	0,6482	0,0024	0,0068
37	247,8837	0,3357	0,6643	0,0023	0,0069

38	254,7693	0,32	0,68	0,0022	0,007
39	261,655	0,3049	0,6951	0,0022	0,0071
40	268,5407	0,2903	0,7097	0,0021	0,0072
41	275,4263	0,2762	0,7238	0,002	0,0073
42	282,312	0,2625	0,7375	0,0019	0,0074
43	289,1976	0,2494	0,7506	0,0019	0,0075
44	296,0833	0,2368	0,7632	0,0018	0,0076
45	302,9689	0,2246	0,7754	0,0017	0,0077
46	309,8546	0,213	0,787	0,0017	0,0078
47	316,7403	0,2018	0,7982	0,0016	0,0079
48	323,6259	0,191	0,809	0,0015	0,008
49	330,5116	0,1807	0,8193	0,0015	0,0081
50	337,3972	0,1709	0,8291	0,0014	0,0082
51	344,2829	0,1615	0,8385	0,0013	0,0083
52	351,1685	0,1525	0,8475	0,0013	0,0084
53	358,0542	0,1439	0,8561	0,0012	0,0085
54	364,9399	0,1357	0,8643	0,0012	0,0085
55	371,8255	0,128	0,872	0,0011	0,0086
56	378,7112	0,1205	0,8795	0,0011	0,0087
57	385,5968	0,1135	0,8865	0,001	0,0088
58	392,4825	0,1068	0,8932	9,51E-04	0,0089
59	399,3682	0,1004	0,8996	9,03E-04	0,009
60	406,2538	0,0943	0,9057	8,56E-04	0,0091
61	413,1395	0,0886	0,9114	8,12E-04	0,0092
62	420,0251	0,0831	0,9169	7,69E-04	0,0093
63	426,9108	0,078	0,922	7,28E-04	0,0093
64	433,7964	0,0731	0,9269	6,89E-04	0,0094
65	440,6821	0,0685	0,9315	6,51E-04	0,0095
66	447,5678	0,0641	0,9359	6,15E-04	0,0096
67	454,4534	0,06	0,94	5,81E-04	0,0097
68	461,3391	0,0562	0,9438	5,48E-04	0,0098
69	468,2247	0,0525	0,9475	5,16E-04	0,0098
70	475,1104	0,049	0,951	4,86E-04	0,0099
71	481,996	0,0458	0,9542	4,58E-04	0,01
72	488,8817	0,0427	0,9573	4,31E-04	0,0101
73	495,7674	0,0399	0,9601	4,05E-04	0,0102
74	502,653	0,0372	0,9628	3,80E-04	0,0102
75	509,5387	0,0346	0,9654	3,57E-04	0,0103
76	516,4243	0,0322	0,9678	3,35E-04	0,0104
77	523,31	0,03	0,97	3,14E-04	0,0105
78	530,1957	0,0279	0,9721	2,94E-04	0,0105
79	537,0813	0,026	0,974	2,76E-04	0,0106
80	543,967	0,0241	0,9759	2,58E-04	0,0107
81	550,8526	0,0224	0,9776	2,41E-04	0,0108

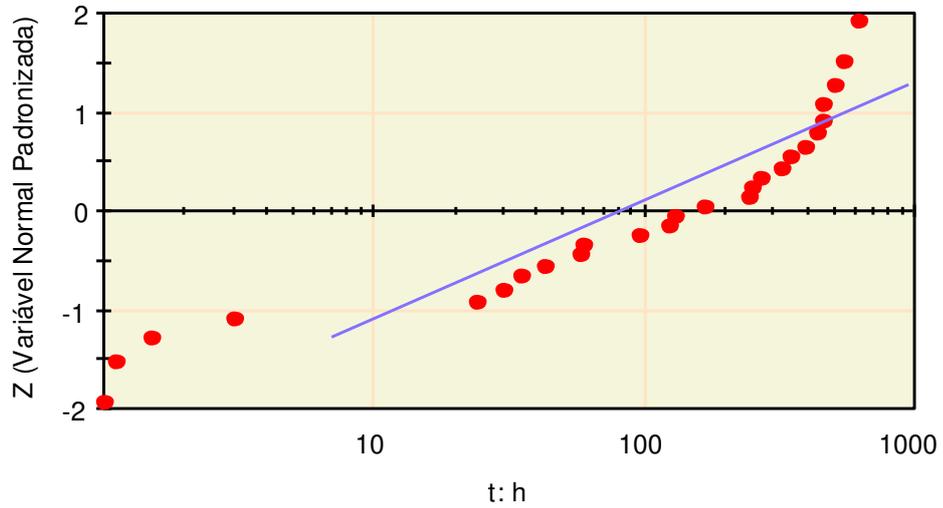
82	557,7383	0,0208	0,9792	2,26E-04	0,0109
83	564,6239	0,0193	0,9807	2,11E-04	0,0109
84	571,5096	0,0179	0,9821	1,97E-04	0,011
85	578,3953	0,0166	0,9834	1,84E-04	0,0111
86	585,2809	0,0154	0,9846	1,71E-04	0,0111
87	592,1666	0,0142	0,9858	1,60E-04	0,0112
88	599,0522	0,0132	0,9868	1,49E-04	0,0113
89	605,9379	0,0122	0,9878	1,38E-04	0,0114
90	612,8235	0,0113	0,9887	1,29E-04	0,0114
91	619,7092	0,0104	0,9896	1,20E-04	0,0115
92	626,5949	0,0096	0,9904	1,11E-04	0,0116
93	633,4805	0,0089	0,9911	1,03E-04	0,0117
94	640,3662	0,0082	0,9918	9,60E-05	0,0117
95	647,2518	0,0075	0,9925	8,91E-05	0,0118
96	654,1375	0,007	0,993	8,26E-05	0,0119
97	661,0231	0,0064	0,9936	7,66E-05	0,0119
98	667,9088	0,0059	0,9941	7,09E-05	0,012
99	674,7945	0,0054	0,9946	6,56E-05	0,0121
100	681,6801	0,005	0,995	6,04E-05	0,0121

APÊNDICE E – Papel da probabilidade: prensa-1 ano 2021

- Exponencial:

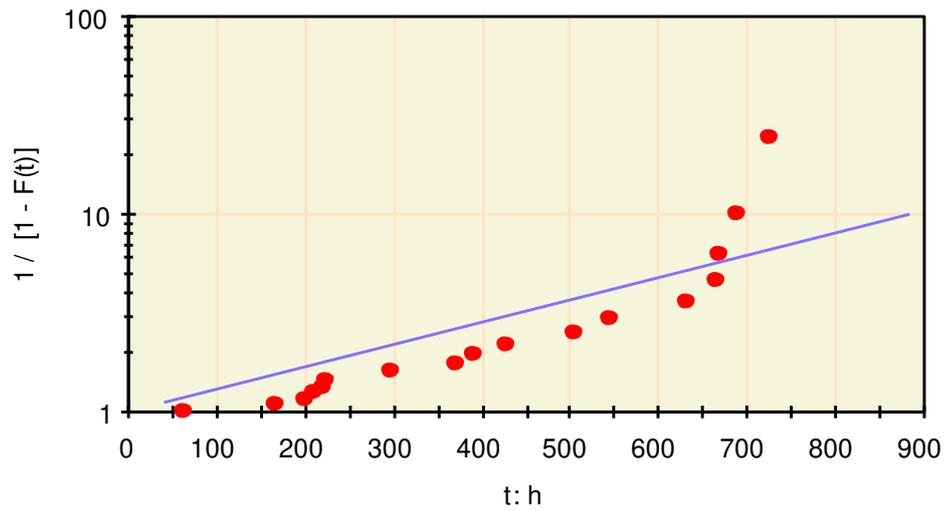


- Lognormal:

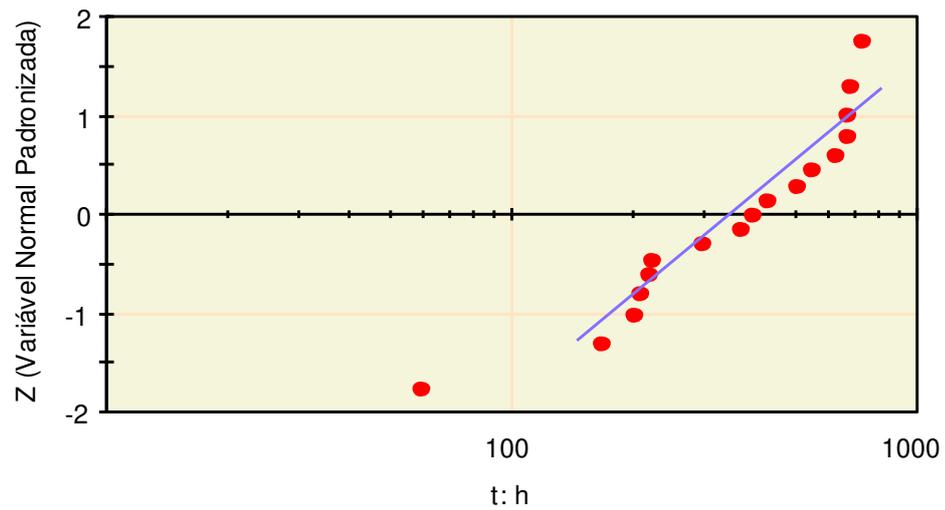


APÊNDICE F – Papel da probabilidade: prensa-1 ano 2022

- Exponencial:

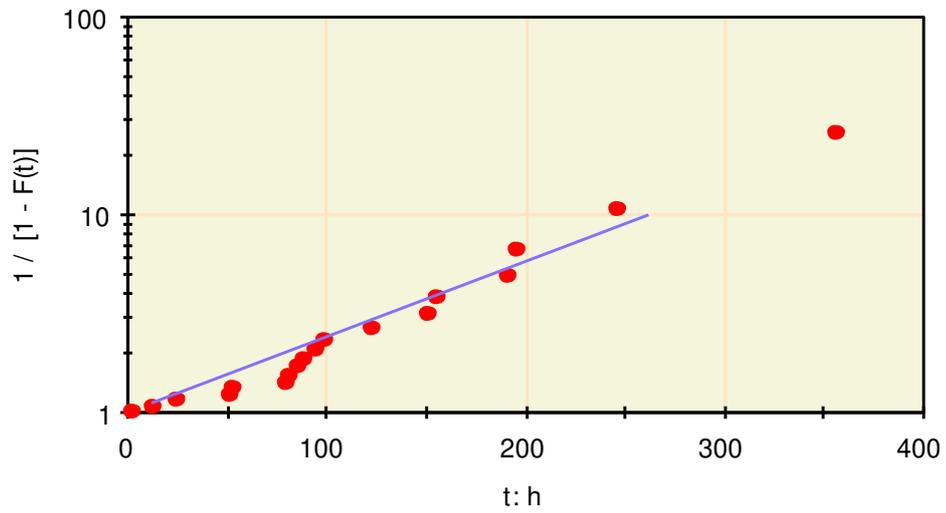


- Lognormal:

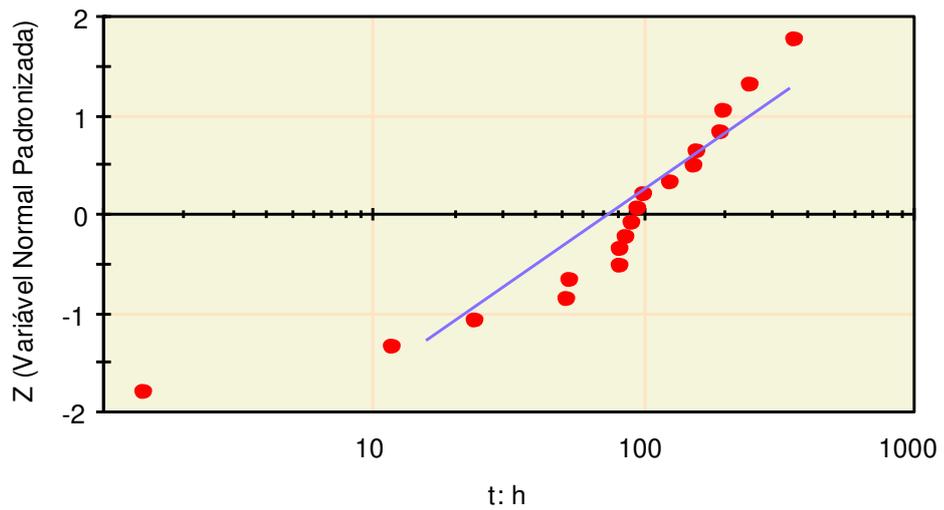


APÊNDICE G – Papel da probabilidade: prensa-2 ano 2021

- Exponencial:

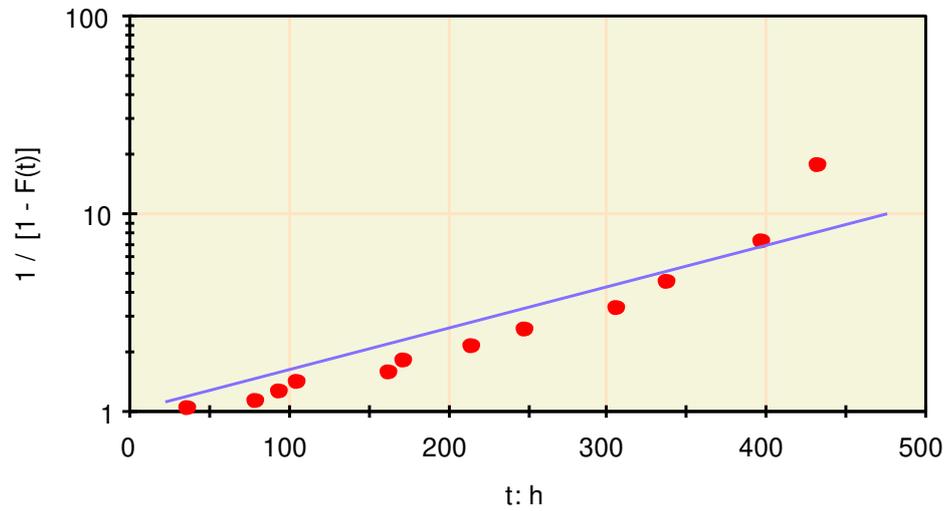


- Lognormal:



APÊNDICE H – Papel da probabilidade: prensa-2 ano 2022

- Exponencial:



- Lognormal:

