

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Gustavo Presto de Oliveira**

**Análise de Falhas de Selos Mecânicos de Bombas D'água**

Juiz de Fora

2018

**Gustavo Presto de Oliveira**

**Análise de Falhas de Selos Mecânicos de Bombas D'água**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Raphael Fortes Marcomini

Juiz de Fora

2018

**Gustavo Presto de Oliveira**

**Análise de Falhas de Selos Mecânicos de Bombas D'água**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 15 de Outubro de 2018.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Raphael Fortes Marcomini  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Moisés Luiz Lagares Junior  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Michel Philipe da Trindade e Silva  
MRS Logística S.A.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, a minha família, professores, colegas de curso e amigos que, ao longo dessa rica jornada acadêmica, me deram incentivo e inspiração para continuar seguindo em frente. Obrigado por todos os ensinamentos e experiências. Agradeço também aos meus colegas de trabalho por todo o aprendizado e informações compartilhados.

"Inspiração é o combustível que impulsiona nossas mentes para a frente noutras galáxias e universos. Inspiração nos faz sonhar, ver novas possibilidades em terras áridas; faz o impossível possível. É a inspiração que cria o criador dentro de nós. Inspiração fará com que você mantenha sua cabeça erguida e reivindique o futuro para si mesmo. Nunca se esqueça de obter a sua dose diária de inspiração."Bangambiki Habyarimana.

## RESUMO

O presente trabalho destaca a importância da confiabilidade e análise de dados de vida, que permitem aos profissionais de manutenção e confiabilidade analisar o padrão de falhas. O estudo foi realizado com dados fornecidos por uma empresa ferroviária brasileira, que tem perda de produção e alto custo de manutenção devido à falhas de bombas dos motores das locomotivas. O componente mais crítico dessas bombas é o selo mecânico, que receberá um foco neste trabalho. Embora a estratégia de manutenção existente na empresa seja preventiva, as falhas acontecem de forma precoce e imprevisível. O objetivo deste estudo é investigar por que os componentes da bomba estão falhando mesmo após as atividades de manutenção serem realizadas conforme padronizado. Com base no comportamento da taxa de falha de bombas d'água em um período de cinco anos e informações obtidas junto à equipe de manutenção, calculou-se o intervalo necessário aproximado para a realização de manutenção. Devido à infinidade de causas possíveis de falha para as bombas d'água, não foi especificado a causa raiz do problema investigado. Porém, são fornecidas descrições de casos com falhas semelhantes que sugerem soluções para aumentar a disponibilidade do ativo. Dessa maneira, a análise realizada busca ajudar na decisão para uma estratégia de manutenção mais adequada possível.

Palavras-chave: Análise de falhas. Statgraphics. Confiabilidade. Bomba d'água. Selo mecânico. Manutenção.

## ABSTRACT

This paper highlights the importance of reliability and life data analysis, which allow maintenance and reliability professionals to analyze failure patterns. The study was carried out with data provided by a Brazilian railway company, which has lost production and high maintenance costs due to engine pump failures of its locomotives. The most critical component of these pumps is the mechanical seal, which will receive a focus on this work. Although the existing maintenance strategy in the company is preventive, the failures happen in an early and unforeseeable way. The purpose of this study is to investigate why pump components are failing even after maintenance activities are performed as standardized. Based on the behavior of the failure rate of water pumps over a five-year period and information obtained from the maintenance team, the approximate interval required for maintenance was calculated. Due to the infinity of possible causes of failure for the mechanical seals, the root cause of the problem investigated was not specified. However, cases with similar descriptions of failure are provided that suggest solutions to eliminate early failures and hence increase asset availability. Therefore, the analysis carried out seeks to help in deciding on a more adequate maintenance strategy.

Key-words: Failure analysis. Statgraphics. Reliability. Water pump. Mechanical seal. Maintenance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Variação ocasionada pela alteração do parâmetro $\beta$ - Distribuição de Weibull [1] . . . . .	18
Figura 2 – Curva da banheira e ciclo de vida de equipamentos [1] . . . . .	18
Figura 3 – Vista exterior da bomba d'água [7] . . . . .	25
Figura 4 – Conjunto de engrenagens acionadoras da bomba [8] . . . . .	26
Figura 5 – Conjunto da bomba d'água [7] . . . . .	27
Figura 6 – Conjunto da bomba d'água mostrando as peças separadas [6] . . . . .	28
Figura 7 – Kit do selo da bomba d'água . . . . .	29
Figura 8 – Método dos 6M para apontar as causas das falhas das bombas d'água .	29
Figura 9 – Consumo de diesel até a falha . . . . .	34
Figura 10 – Distribuição de Weibull . . . . .	36
Figura 11 – Frequência das distribuições e Função Densidade de Probabilidade . . .	37
Figura 12 – Função de Sobrevivência . . . . .	38
Figura 13 – Função de Risco . . . . .	39
Figura 14 – Ficha de verificação sugerida pela GE para manutenção das bombas d'água [9] . . . . .	44



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição do conjunto da bomba d'água [7]	27
Tabela 2 – Descrição do conjunto da bomba d'água mostrando as peças separadas [6]	28
Tabela 3 – Ocorrências de falhas nas bombas d'água	31
Tabela 4 – Registros de abastecimento da locomotiva 903407	31
Tabela 5 – Tabela de vida das bombas d'água calculada pelo STATGRAPHICS	35
Tabela 6 – Tabela de percentis calculada pelo STATGRAPHICS	37

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>10</b>
1.1	Considerações iniciais . . . . .	10
1.2	Motivação . . . . .	10
1.3	Objetivos . . . . .	10
1.3.1	Objetivo Geral . . . . .	10
1.3.2	Objetivos Específicos . . . . .	10
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>12</b>
2.1	Revisão bibliográfica . . . . .	12
2.2	Informações técnicas sobre as bombas d'água . . . . .	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES . . . . .</b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>40</b>
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	41
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>42</b>
	<b>ANEXO A – Ficha de verificação sugerida pela GE para ma- nutenção das bombas d'água . . . . .</b>	<b>44</b>
	<b>ANEXO B – TERMO DE AUTENTICIDADE . . . . .</b>	<b>45</b>
	<b>ANEXO C – DECLARAÇÃO DA EMPRESA . . . . .</b>	<b>46</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

O presente trabalho realizará uma análise estatística de falhas em bombas d'água, equipamentos utilizados para refrigerar o motor de locomotivas, através de ferramentas de confiabilidade. A partir de uma base de dados com informações de falha e manutenção fornecida por uma empresa ferroviária nacional, serão construídas curvas características que descrevem o comportamento das falhas. Por meio destas curvas será estimado o ciclo de vida das bombas d'água estudadas. Feita a análise estatística e avaliando diversos contextos de falha, busca-se identificar os principais pontos de melhoria para a criação de ações efetivas que visam evitar a recorrência de falhas, estendendo assim o intervalo entre as manutenções, que apresentam um custo elevado aproximado de 10.500 reais, além de 8 horas de mão de obra, para cada parada.

## 1.2 Motivação

As bombas d'água estudadas apresentam falhas precoces e imprevisíveis, que têm como principal causa, segundo relatos da literatura e registros de manutenção, o material dos selos mecânicos utilizados para vedação deste sistema. Segundo o fornecedor das bombas d'água, o ciclo de vida previsto destes equipamentos, estimado pelo consumo de diesel do motor no qual eles são acoplados, é de 2.5 milhões de litros. Porém, através dos registros de abastecimento das locomotivas, 96% das bombas d'água performaram, no máximo, apenas 12% daquilo que foram projetadas para perfomar. Além disso, 90% das falhas foram apontadas pelos registros de manutenção como sendo provenientes do material dos selos mecânicos. A baixa disponibilidade destes equipamentos resulta em perda de produtividade e pode levar a maiores prejuízos.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

Fazer uma análise das falhas das bombas d'água e dos selos mecânicos para identificar soluções para mitigar os principais problemas e propor melhorias que irão elevar a disponibilidade do ativo.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo de confiabilidade em manutenção com ênfase nos componentes mais críticos das bombas d'água, os selos mecânicos.
- Determinar o comportamento do ciclo de vida das bombas d'água estudadas.

- Buscar na literatura as causas e soluções para as falhas precoces em bombas d'água.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Revisão bibliográfica

No dia 16 de agosto de 2009, uma locomotiva a diesel do trem de passageiros VIA Rail Canada Inc. pegou fogo com o trem em movimento a cerca de 152 km/h. Segundo o Relatório de Investigação de Ferrovias do TRANSPORTATION SAFETY BOARD OF CANADA (2009), uma perda de energia fez com que o motor diesel parasse e os freios se aplicassem. O trem parou e evacuou 323 passageiros. Embora não tenha havido feridos graves, um dos engenheiros de locomotivas exigiu atenção médica para exposição à fumaça. Após uma análise de laboratório, determinou-se que a junta do anel de vedação da bomba havia sido comprimida. Durante a operação normal do trem, criou-se vibrações excessivas na bomba que levaram a trincas por fadiga progressiva de alto ciclo e à falha de dois dos quatro parafusos de montagem. As vibrações continuadas levaram à eventual falha da bomba.

Existem muitas razões pelas quais as vedações falham, o trem de passageiros VIA Rail Canada Inc. foi apenas uma dessas possíveis situações. Embora seja impossível determinar todas as causas das falhas do sistema de vedação, existem muitos registros, como o do trem canadense, de lições aprendidas e que podem ser aplicadas para ajudar a minimizar as falhas em selos. Saber o que procurar pode evitar que as falhas ocorram novamente. Algumas das causas mais comuns e bem diagnosticadas de falhas de vedação são apresentadas por DALE M. ASHBY (2005), juntamente com metodologias para melhorar a confiabilidade das aplicações de vedação nas instalações de produção.

DALE M. ASHBY (2005) categoriza os selos entre os que funcionam de forma estática e os que funcionam de forma dinâmica. Embora haja muitos tipos de vedações disponíveis para uso, existem alguns tipos comuns de modos de falha de vedação que podem ser discutidos e que se aplicam a uma ampla variedade de soluções de vedação, independentemente da forma ou material de construção. Os selos fornecem uma contribuição importante para o funcionamento de muitas indústrias diferentes. Esses dispositivos onipresentes são encontrados em bombas centrífugas, reatores, misturadores, sopradores, compressores e algumas bombas de deslocamento positivo. Apesar de seu uso generalizado, muitas vezes eles recebem pouca consideração. Com uma melhor compreensão dos selos, sua seleção, considerações de material e requisitos operacionais, os usuários podem melhorar muito a confiabilidade do equipamento e reduzir os custos operacionais.

DALE M. ASHBY (2005) apropria as falhas de vedação a uma variedade de influências ambientais, incluindo temperatura, pressão, incompatibilidades de fluidos, tempo e fatores humanos. O diagnóstico de falha pode ser complexo, em muitos casos abrangendo várias dessas influências no mesmo cenário de falha. Outro motivo para falha é que muitas vedações são danificadas de alguma forma durante a instalação, resultando em

vazamento prematuro da vedação. Alguns dos indicadores visuais de danos na instalação incluem cortes curtos, entalhes em V na vedação, superfície esfolada em áreas localizadas ou área fina e sem casca na vedação. No entanto, a chave real para diagnosticar danos na instalação é normalmente o tempo; selos que falham muito rapidamente, ou nunca vedam totalmente, normalmente são vítimas de danos por instalação inadequada da vedação. São discutidos alguns outros tipos comuns de falhas de selo que são relativamente fáceis de diagnosticar.

Provavelmente, o modo de falha de vedação mais conhecido é a perda de resiliência. Quando as vedações não se recuperam depois de terem sido deformadas por algum período de tempo, a vedação exibirá uma superfície achatada. Há vários fatores que contribuem para este tipo de falha, segundo DALE M. ASHBY (2005), incluindo exposição a temperaturas excessivas, fluidos incompatíveis ou deformação excessiva do material durante a instalação. A solução para esse tipo de falha normalmente envolve a análise do projeto para assegurar que a deflexão adequada para o selo estava presente, além de investigar se o material escolhido para a aplicação era apropriado em termos de estabilidade térmica e resistência ajustada à compressão.

O segundo tipo mais comum de falha com selos é quando a vedação começa a se rasgar em pequenos pedaços, aponta DALE M. ASHBY (2005). À medida que os rasgos continuam, a quantidade que é arrancada aumenta ao ponto em que uma grande parte do selo se degrada. Por fim, o selo perde sua forma geral e se desloca para qualquer área vazia disponível. Causas típicas deste tipo de falha estão relacionadas aos diferenciais de pressão a que o selo está exposto em comparação com as folgas existentes de acoplamento. Folgas excessivas e material de vedação incorreto (por exemplo, dureza muito baixa) são fatores que contribuem para esse tipo de falha. Há uma série de sugestões para corrigir este tipo de falha, como aumentar a dureza do elemento de vedação, diminuir as folgas entre o material de acoplamento, reprojeter as dimensões do elemento de vedação ou simplesmente adicionar dispositivos anti-extrusão, normalmente chamados de anéis de apoio, ao pacote de elementos de vedação.

Outro tipo de falha de vedação descrito por DALE M. ASHBY (2005) são as bolhas, fissuras, marcas de pústulas ou cavidades, tanto externamente quanto internamente. A principal razão para isso é o aprisionamento de gás no elastômero durante ciclos de alta pressão, seguido por uma rápida despressurização (ou descompressão). Essa falha pode ser violenta e, em alguns casos, pode causar uma situação catastrófica. A principal solução para este tipo de falha de vedação é especificar outro material de elastômero que seja mais resistente à descompressão explosiva ou que mude radicalmente o projeto da vedação. Se possível, selos poliméricos ou metálicos devem ser usados.

O desgaste normal é outro tipo de falha de vedação que é comum e, de fato, esperado. Esse tipo de falha, segundo DALE M. ASHBY (2005), parece um polimento

suave da superfície de vedação causada pelo movimento relativo da vedação contra a superfície de contato. Em exemplos dinâmicos ou pseudo-dinâmicos, pode-se esperar que os selos se desgastem, mas isso deve ocorrer de maneira gradual e previsível. A possível solução para o desgaste excessivo é, novamente, considerar um material de maior dureza ou possivelmente reprojeter o selo, considerando uma solução polimérica.

Os selos mecânicos também têm vários modos de falha exclusivos que podem ser difíceis de determinar devido à complexidade relativa do próprio conjunto de vedação. DALE M. ASHBY (2005) apresenta estes modos de falha exclusivos: descamação ou corrosão da face do selo; descamação ou corrosão das faces de carbono; degradação dos selos do energizador de elastômero; e quebra de mola ou fole. A principal razão pela qual as vedações mecânicas falham prematuramente nessas formas é a degradação diretamente nas faces da vedação, causando desgaste severo rapidamente.

Os possíveis modos de falha dos selos são tão amplos quanto o número de soluções disponíveis. A condição do equipamento pode revelar um rico conjunto de informações que revelam a maneira como o equipamento foi operado, mantido e, eventualmente, degradado. Perceber que o equipamento falhou é apenas o começo. Entender como e por que ele falhou pode ser mais útil, pois dá ao usuário a oportunidade de eliminar ou atenuar as causas da falha. Infelizmente, este não é um exercício casual e requer uma abordagem estruturada. Felizmente, os métodos de resolução de problemas podem ser demonstrados e extrapolados para uma ampla variedade de aplicações.

A ciência da predição da vida útil do selo se fortalece com modelos de previsão em testes extensivos, pesquisa e confirmação empírica. Demanda-se um esforço contínuo da indústria de vedação para melhorar as técnicas de modelagem disponíveis e inovar configurações de projeto com o objetivo de evitar a passagem indesejada de sólido, líquido, gás ou vapor de um ponto para outro. Nesse meio tempo, o diagnóstico bem-sucedido de falhas no sistema de vedação continua sendo uma necessidade central da comunidade de engenharia.

JASBIR SINGH (2012) relata o vazamento de uma máquina ou componentes da máquina como um modo de falha ou sintoma. Se trata de evento de causa que isoladamente ou em combinação com outros eventos de causa, leva a vários modos de falha ou a um modo de falha geral, incluindo eventos de causa relacionados ao design, ao processo, à operação e à manutenção. JASBIR SINGH (2012), após consultar engenheiros de projeto e prática, criou uma lista de eventos das principais causas de falhas em bombas d'água. Alguns desses eventos de causa influenciam diretamente o modo de falha de um selo mecânico. As causas levantadas foram: problema de contaminantes abrasivos, material de vedação inadequado, problema de manutenção do coeficiente de velocidade de pressão, pressão excessiva de fluido, design de vedação incorreto, lubrificação de vedação insuficiente, temperatura excessiva da face de vedação e falha da vedação secundária levam o selo

a falha diretamente. Por exemplo, a temperatura excessiva da face da vedação leva a uma alta geração de calor, causando falha na vedação. Da mesma forma, a lubrificação insuficiente da vedação leva à falha da vedação porque a lubrificação inadequada causa alta geração de calor na vedação, o que leva a uma falha na vedação. Além disso, a falha da vedação secundária pela falha da mola faz com que a vedação fique virada para o lado contrário às partes estacionárias e rotativas, levando a vazamento de fluido, o que é inaceitável e é um sintoma de falha da vedação. Quando contaminantes abrasivos entram no sistema, eles levam ao desgaste do selo mecânico e sua eficiência de operação diminui. Esses eventos de causa são chamados de eventos de causa direta. Outros eventos de causa, como problemas de desalinhamento, montagem inadequada da vedação e instalação e práticas de manutenção inadequadas são chamados de eventos de causa indireta. Por exemplo, práticas de manutenção inadequadas, como resfriamento inadequado, levam a um aumento na temperatura da face da vedação, o que causa ainda mais falha na vedação. O desalinhamento causa um contato entre as faces do selo e a parte do contato, como o eixo, aumentando o atrito e, conseqüentemente, a temperatura nas superfícies de contato, levando à falha da vedação.

De acordo com GRUNDFOS MANAGEMENT (2009), a falha do selo do eixo mecânico é a causa mais comum de falhas em bombas d'água (39 %), seguido por rolamentos (18 %) e roletes (34 %). A vedação do eixo é exposta a condições operacionais muito variáveis. Às vezes, as condições de operação mudam para se tornar bem diferentes das condições específicas para as quais o selo foi planejado.

As causas mais comuns de falha dos vedantes mecânicos são discutidas por GRUNDFOS MANAGEMENT (2009). A primeira causa relatada se trata do funcionamento a seco e a lubrificação deficiente, que podem produzir aumento de temperatura e gerar um ruído alto. O filme lubrificante no gap de vedação é submetido a grandes gradientes de temperatura, pressão e velocidade. Isto aumenta o risco de precipitação e sedimentação dentro ou próximo do intervalo de vedação. A incompatibilidade com o ambiente químico e/ ou térmico também contribui para a degradação. As partes elastoméricas do polímero podem exibir muitos sinais de degradação, incluindo bolhas, fissuras, vazios ou descoloração. Em alguns casos, a degradação pode ser verificada apenas medindo as propriedades físicas.

Outro tipo de falha das vedações apontada por GRUNDFOS MANAGEMENT (2009) são causadas pela montagem e manuseio incorretos. Os exemplos podem ser desalinhamento do eixo, assentos não montados perpendicularmente ao eixo ou eixo axialmente móvel e comprimento de montagem incorreto.

Por fim, GRUNDFOS MANAGEMENT (2009) aborda as falhas do sistema, que ocorrem quando os parâmetros operacionais diferem ligeiramente do que o sistema foi projetado, afetando o desempenho da vedação. Os parâmetros que afetam o desempenho de uma vedação mecânica são a pressão na câmara de vedação, a temperatura ao redor da



vedação do eixo na câmara de vedação, o meio bombeado, a velocidade e as dimensões da vedação. Se estes parâmetros não estiverem corretos para a aplicação em questão, o resultado pode ser o mau funcionamento ou danos à vedação. Como solução, é sugerido um esquema de análise de falhas. O objetivo do esquema é ajudar na solução de problemas e fornecer dados para possíveis melhorias no uso da vedação e gerenciar os parâmetros envolvidos.

ANGELYNA FAGUNDES (2011) apresenta um estudo de caso onde é feita uma análise quantitativa de confiabilidade e disponibilidade de um torno mecânico. Para esta análise foram aplicadas os conceitos para se quantificar a probabilidade de ocorrência de uma falha.

Segundo ANGELYNA FAGUNDES (2011), é possível considerar a condição de operação de um sistema como um experimento aleatório, no qual podem ser identificados qualitativamente nos estados de falha ou operação normal. Estes estados podem ser expressos numericamente utilizando-se o conceito de variável aleatória. Portanto, pode-se criar uma variável aleatória “tempo até a falha” - *ttf* (time to failure), para quantificar a probabilidade de ocorrência de uma falha.

O conceito da função densidade de probabilidade acumulada, de uma variável aleatória  $T$ , é expresso através da expressão 2.1, e representa a probabilidade da variável aleatória  $T$  assumir valores pertencentes ao intervalo  $(-\infty, t)$ .

$$F_T(t) = P[T \leq t] = \int_{-\infty}^t f_T(x)dx \quad (2.1)$$

Onde  $t$  é o tempo,  $f_T(t)$  é a função densidade de probabilidade é definida em 2.2 como a derivada da densidade de probabilidade acumulada ( $F_T(t)$ ):

$$f_T(t) = \frac{dF_T(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Reescrevendo em termos da variável aleatória *ttf* (tempo até a falha) e considerando-se um instante de tempo  $t$ , ANGELYNA FAGUNDES (2011) chegou na expressão 2.3. A expressão  $F_{ttf}(t)$  foi simplificada por  $F(t)$  em 2.4.

$$f_{ttf}(t) = \frac{dF_{ttf}(t)}{dt} \quad (2.3)$$

$$F(t) = F_{ttf}(t) = P[ttf \leq t] \quad (2.4)$$

A função densidade de probabilidade de uma variável aleatória (expressão 2.2) em estudos de confiabilidade, de acordo com ANGELYNA FAGUNDES (2011), é definida por

$f(t)$  e representa a frequência relativa de ocorrência para cada valor da variável aleatória  $t$ . Conseqüentemente, a expressão 2.2 pode ser reescrita como a expressão 2.5:

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

Considerando-se a Função de Sobrevivência  $R(t)$  como a probabilidade acumulada de não falha, o somatório de  $R(t)$  e  $F(t)$  deve ser unitário e é calculado conforme 2.6

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.6)$$

ANGELYNA FAGUNDES (2011) aborda as principais distribuições de interesse para a manutenção, dentre elas a de Weibull. Weibull é nomeado devido a Waloddi Weibull, e essa distribuição é muito utilizada na análise de confiabilidade e dados de vida devido à sua versatilidade e simplicidade. A expressão mais geral de Weibull é dada por três parâmetros,  $\beta$ ,  $\eta$  e  $\Gamma$ , onde  $\beta$  é o parâmetro de forma porque define a forma dessa distribuição e também é conhecido como declividade de Weibull,  $\eta$  é o parâmetro de escala e define o espalhamento da distribuição e  $\Gamma$  é o parâmetro de localização e representa a partir de quanto tempo de operação o equipamento passou a apresentar as falhas. Frequentemente, o parâmetro de localização não é usado e o valor desse parâmetro é definido como zero.

As características importantes da distribuição de Weibull são  $\beta$  e  $\eta$ , aponta ANGELYNA FAGUNDES (2011). Esses valores paramétricos ajudam na compreensão do padrão de falha, ou seja, se a falha está na mortalidade infantil, em falhas aleatórias ou desgaste, expressando a confiabilidade do componente em um determinado momento.

Alterando-se o parâmetro de forma, a função densidade de probabilidade de Weibull pode ser utilizada em uma diversidade de situações e dependendo do valor de  $\beta$ , torna-se igual ou muito semelhante a outras distribuições. A função de Weibull para o modelo de confiabilidade de ANGELYNA FAGUNDES (2011) é dada por 2.7

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.7)$$

A figura 1 apresenta a variação ocasionada pela alteração do parâmetro  $\beta$ . Observa-se que quando  $\beta$  tem valor unitário, a distribuição de Weibull é reduzida a distribuição exponencial. Quando  $\beta$  é aproximadamente 3, a distribuição de Weibull torna-se a distribuição normal.

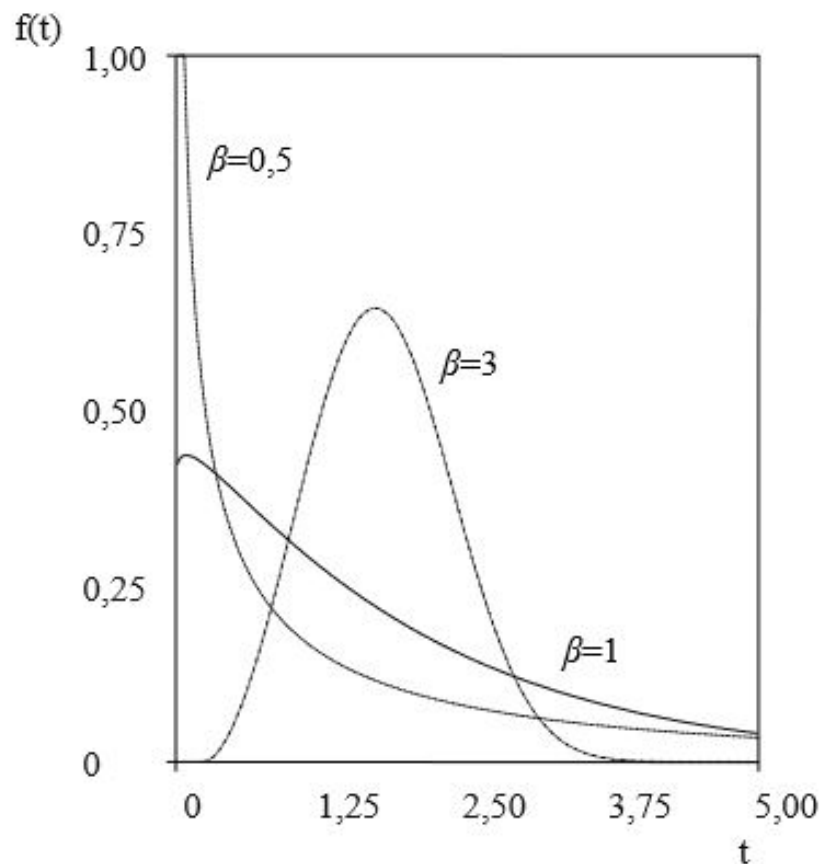
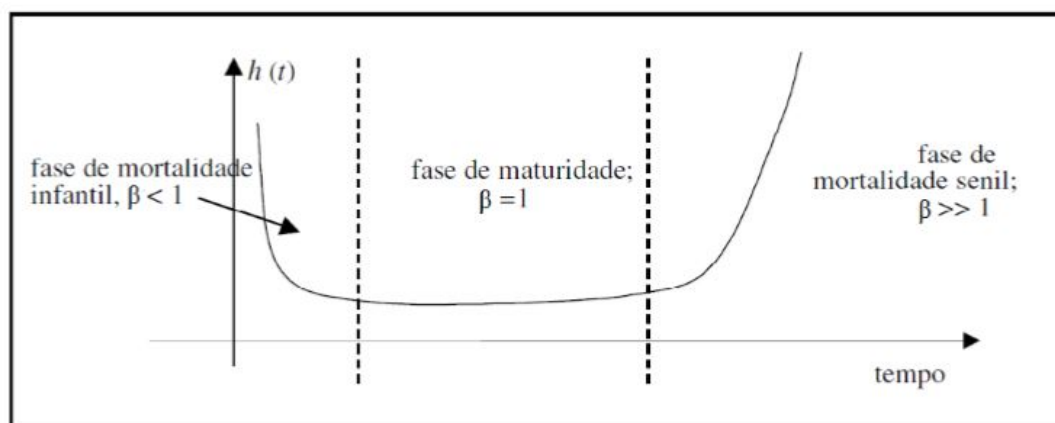


Figura 1 – Variação ocasionada pela alteração do parâmetro  $\beta$  - Distribuição de Weibull [1]

A análise do comportamento da taxa de falha de um equipamento ao longo do tempo pode ser representada pela curva da banheira na Figura 2, sendo associada ao parâmetro  $\beta$ .



Fonte: Sellitto, 2005

Figura 2 – Curva da banheira e ciclo de vida de equipamentos [1]

ANGELYNA FAGUNDES (2011) faz uma análise para cada um dos três ciclos

da curva da banheira. No período de mortalidade infantil é comum uma alta taxa de falhas, que são causadas por defeitos congênitos ou fraquezas, erros de projeto ou processos de fabricação inadequados, principalmente. Conforme os reparos vão eliminando os componentes frágeis, as falhas tendem a reduzir. Nesse momento predomina uma taxa de falha constante, onde as falhas ocorrem de forma aleatória por diversos motivos. Por fim, as falhas voltam a se elevar, em função do desgaste natural do componente com o tempo. Em um primeiro momento, a melhor estratégia de manutenção é a corretiva, depois a preditiva e, por fim, a preventiva.

As análises de confiabilidade de Weibull podem ser construídas utilizando-se as fórmulas tradicionais de confiabilidade por meio do excel, já que esta ferramenta é mais facilmente encontrada e por isso é interessante que seja considerada. No material do IME (2008) são descritas as funções de confiabilidade  $R(t)$ , probabilidade de falhar um componente  $F(t)$  e a função de risco.

A confiabilidade  $R(t)$  de um componente é dada por 2.8

$$R(t) = e^{[-(\frac{t-\gamma}{\eta})^\beta]} \quad (2.8)$$

a probabilidade de falhar um componente  $F(t)$  é dada por 2.9

$$F(t) = 1 - e^{[-(\frac{t-\gamma}{\eta})^\beta]} \quad (2.9)$$

e a função de risco é dada pela expressão 2.10

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.10)$$

A distribuição de Weibull será considerada adequada se os pontos que acompanham de perto a linha ajustada pela função de distribuição acumulada  $F(t)$  se ajustar bem aos dados. A distribuição acumulada  $F(t)$  dos dados é utilizada pois ela pode ser linearizada e, ao aplicar o procedimento de regressão, é possível determinar os parâmetros da reta  $\beta$  e  $\eta$ , conforme explica B.W. TURNBULL (1976).

Partindo da equação 2.9, temos

$$F(t) = 1 - e^{[-(\frac{t-\gamma}{\eta})^\beta]}$$

$$-\ln(1 - F(t)) = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta$$

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln(t - \gamma) - \beta \ln(\eta)$$

onde, para a equação da reta 2.11

$$y = mx + c \quad (2.11)$$

temos:

$$y = \ln(-\ln(1 - F(t)))$$

$$x = \ln(t - \gamma)$$

$$m = \beta$$

$$c = \beta \ln(\eta)$$

O número mínimo de elementos da amostra com base na estimativa da proporção populacional necessário para um estudo de probabilidade é dado por TRIOLA (2002) pela equação 2.12.

$$n \geq \frac{Npq(Z_{\frac{\alpha}{2}})^2}{pq(Z_{\frac{\alpha}{2}})^2 + (N - 1)E^2} \quad (2.12)$$

Onde: n é o número de elementos da amostra a ser definido, N é o tamanho da população da pesquisa, p é a probabilidade de sucesso, q=1-p, ou a probabilidade de insucesso,  $Z_{\frac{\alpha}{2}}$  é o valor crítico resultante do grau de confiança da pesquisa, ou nível de confiança, e E é a margem de erro.

Esta equação se aplica quando o tamanho da amostra (n) é maior ou igual a 5% do tamanho da população (N).

Outro estudo de confiabilidade foi realizado para um conjunto de bombas usadas em uma das instalações de fabricação na Arábia Saudita. No estudo, realizado por MOHAMMED ALI (2017), as falhas das bombas são apontadas como aleatórias, e causam um tempo de inatividade e altos custos de manutenção. A estratégia de manutenção adotada para essas bombas era a manutenção preventiva. Devido à aleatoriedade das falhas, a equipe de manutenção estava repetidamente realizando ações corretivas além da manutenção preventiva de rotina para restaurar as bombas de volta às operações. Essas ações de manutenção não planejadas estavam causando um aumento significativo no custo de manutenção. Este caso foi então selecionado para um estudo de confiabilidade para descobrir o motivo de falhas inesperadas e para decidir a estratégia de manutenção aplicável com uma frequência correta.

Segundo estudos realizados por MOHAMMED ALI (2017), o custo de atividades de manutenção não planejadas é 30% maior do que as de manutenção planejadas.

No estudo de MOHAMMED ALI (2017), o maior número de falhas nas bombas d'água é atribuído à falha dos selos mecânicos (38%), seguidos pelo impulsor (26%) e pelos mancais (16%). A porcentagem de falhas relacionadas aos selos mecânicos estão próximas daquelas apresentadas por GRUNDFOS MANAGEMENT (2009) . Selos mecânicos e rolamentos são essencialmente itens não reparáveis e estavam sendo substituídos após a falha.

MOHAMMED ALI (2017) coletou dados de tempo até a falha de um período de 6 anos e analisou os parâmetros de confiabilidade relacionados, onde  $\beta$  e  $\eta$  foram determinados pelo software *Weibull ++*.

MOHAMMED ALI (2017) concluiu que as principais falhas das bombas estavam associadas aos componentes de vedações, rolamentos e rotores, apresentando um padrão de falha de mortalidade infantil ou falhas aleatórias. Descobriu-se também que as vedações e os mancais falharam devido a instalação incorreta. A equipe de manutenção não estava totalmente ciente do procedimento de manutenção padrão. Após todas as análises, recomendou-se revisar os procedimentos de manutenção padrão para todos os equipamentos críticos para evitar a mortalidade infantil e melhorar o conhecimento e os conjuntos de habilidades da equipe de manutenção, fornecendo treinamento eficaz.

A confiabilidade de qualquer bomba centrífuga em uma aplicação crítica é fortemente influenciada pelo desempenho dos selos mecânicos, aponta MOHAMMED ALI (2017). É amplamente aceito com base na ampla experiência operacional que os selos mecânicos são os componentes mais vulneráveis na estrutura da bomba e sua vida não é fácil de prever. Dependendo do produto que está sendo vedado e das condições operacionais, os selos podem durar de algumas semanas a 20 anos. A performance de qualquer selo mecânico é altamente determinada pelo design da interface do selo e a interface dos materiais utilizados. Um dos principais problemas que afetam o desempenho da vedação é encontrar um equilíbrio entre a taxa de vazamento da vedação e o desgaste nas faces da vedação. A situação ideal seria, naturalmente, aquela em que a vedação se beneficia da lubrificação total do fluido e apresenta baixas taxas de vazamento.

Duas falhas em vedações foram exploradas por VUGAR A. MAMMADOV (2010). Ambas as falhas de vedação tinham evidências visuais comuns e foram minuciosamente investigadas para identificar uma causa raiz. Ambos os selos falhados foram analisados na oficina de contratantes da bomba. Após a desmontagem dos componentes principais, tornou-se óbvio que o anel de acoplamento interno estava completamente destruído e que os pinos antirrotação da manga estavam danificados. O anel primário interno foi severamente danificado com uma aparência lascada em toda a superfície. Fragmentos de metal semelhantes a cobre também foram encontrados na glândula de vedação. A

manga do eixo estava descolorida sob a vedação interna. O anel de vedação rotativo da vedação externa tinha formação de escala e um anel de vedação estacionário danificado. O guia de fluxo interno estava severamente corroído. As faces do selo tinham sofrido por falta de resfriamento. Havia marcas de calor visuais, rotação térmica dos anéis de vedação, que testemunhavam falta de resfriamento causada pelo modo de jejum. Mais uma evidência para o estresse térmico foi a descoloração da manga do eixo sob a vedação interna. A desintegração completa do anel de acoplamento interno e o corte de todos os pinos antirrotação na luva do eixo indicavam excesso de torque devido ao atrito pesado sob condições de funcionamento a seco. Os fragmentos do anel de vedação fraturado causaram danos pesados à luva do eixo durante a rotação adicional da bomba. Com base nos resultados da análise de falha de causa raiz, foi proposta a restauração da função de trip da pressão de fluido de baixa barreira, que ofereceria uma melhor proteção durante o fluxo de buffer reduzido devido ao bloqueio do filtro ou da linha de fornecimento de fluido de resfriamento.

Práticas importantes para a manutenibilidade dos selos são abordadas por MICHAEL HUEBNER (2005). Flutuações na pressão ou temperatura, adição ou criação de compostos intermediários e operações de partida e parada não são incomuns. O equipamento pode exigir limpeza, vaporização ou esterilização entre lotes. Devido a essas grandes variações, os usuários tendem a usar equipamentos de grandes dimensões para permitir mudanças ou futuros aumentos de capacidade. Isso resulta em bombas funcionando bem longe de seu melhor ponto de eficiência. Como resultado, a vida útil e o desempenho de vedação da bomba são comprometidos. A seleção de materiais também é um desafio em alguns processos. Enquanto aços inoxidáveis austeníticos e fluoroelastômeros são usados na maioria das indústrias, o processamento químico pode levar a seleção de materiais ao limite da tecnologia atual. Materiais exóticos, como titânio ou zircônio, podem ser necessários para materiais metálicos. Materiais de vedação podem incluir politetrafluoroetileno, perfluoroelastômeros e grafite flexível. Os materiais da face do selo podem exigir graus de carbono e cerâmicas especiais e resistentes quimicamente. De longe, os aspectos mais desafiadores da seleção de selos são devido à natureza dos próprios fluidos. Quase todo fluido em uma refinaria é um bom lubrificante. Fluidos de processo podem polimerizar nos componentes da vedação ou cristalizar em exposição à atmosfera. Pode haver grandes oscilações nas propriedades do fluido durante um lote ou entre processos.

Segundo MICHAEL HUEBNER (2005), para muitos produtos químicos que são tóxicos ou perigosos, os selos e outros sistemas devem ser projetados de tal forma que não haja vazamento atmosférico sob nenhuma circunstância. Um dos conceitos fundamentais de uma vedação mecânica é criar uma separação muito pequena entre as faces de vedação giratória e estacionária. Este filme deve ser pequeno o suficiente para controlar vazamentos, mas não permitir contato excessivo com a face. Os filmes de fluido reais são da ordem de 0,5 mm (ou 20 milionésimos de polegada) na aplicação de vedação típica. Qualquer

condição que comprometa este filme afetará o desempenho do selo. A bomba, a tubulação, a placa de base, o selo mecânico, os sistemas de suporte da vedação, o acoplamento e o acionador são partes integrantes do sistema de bombeamento. A falha de qualquer um desses componentes causará falha de todo o sistema. Em um nível operacional, a degradação ou a aplicação incorreta em qualquer um desses componentes pode aparecer como uma falha em um componente diferente. Os selos mecânicos geralmente atuam como o barômetro para a integridade dos sistemas. Estirpe de tubo, cavitação ou desalinhamento de acoplamento podem aparecer inicialmente como uma falha de vedação. Os selos são frequentemente identificados como o problema e não como o sintoma de outro problema. É nesse ponto que os usuários com boa confiabilidade de equipamentos diferem daqueles com pouca confiabilidade - a capacidade de investigar e entender os fatores que afetam o desempenho.

Definir uma lista abrangente de fatores que poderiam causar falha na vedação mecânica devido à variedade de produtos químicos e processos não é tão simples. Olhando para muitos setores diferentes e usuários finais, é possível ver alguns padrões repetidos que levam ao sucesso ou fracasso. Ao abordar esses fatores, os usuários podem melhorar o desempenho e a confiabilidade de suas bombas e vedações. A vedação e o sistema devem ser projetados para tolerar todos esses requisitos de operação e seleção da bomba.

Mesmo após anos de treinamento e experiência, procedimentos de pilotos de aeronaves passam por uma lista de verificação antes de cada voo. Isso garante que nenhuma etapa será esquecida ou tomada como garantida. Operar uma bomba e selar em muitos processos pode ser igualmente perigoso e merece um foco igual em seguir os procedimentos estabelecidos. Sempre que possível, o treinamento deve ser documentado com um procedimento escrito. Para ajudar a tornar o procedimento relevante para os operadores, ele deve ser documentado em uma lista de verificação que os operadores podem transportar consigo durante o comissionamento e operação de uma bomba e vedação. MICHAEL HUEBNER (2005) estava envolvido em um exercício de solução de problemas em uma grande fábrica química. A documentação foi preparada para descrever conclusivamente a causa dos problemas e cópias de estudos publicados anteriormente foram fornecidas para a revisão dos usuários. Depois de alguns minutos, eles olharam para cima e afirmaram que já sabiam de tudo aquilo. Era assim que operavam suas bombas e queriam saber o que poderia ser feito para melhorar o desempenho delas. Embora a reunião tenha durado algum tempo, efetivamente terminou quando eles afirmaram que não estavam dispostos a corrigir as condições que estavam causando seus problemas. Se você não mudar nada, nada mudará. Melhorar a confiabilidade da bomba e da vedação começa com uma mudança de foco do custo inicial e da velocidade do reparo. Isso requer um reconhecimento do custo total de propriedade de um nível de gerenciamento. Também requer dedicação para fazer melhorias nos equipamentos e sistemas existentes que não estão fornecendo confiabilidade aceitável. Finalmente, requer um programa de confiabilidade



consistente para colocar esses conceitos em procedimentos. Embora os esforços iniciais possam parecer altos, os resultados proporcionam economias a médio e longo prazo.

FERNANDO VICENTE (2011) apresenta um estudo de caso onde foram utilizadas as técnicas dos 5 porquês, a análise de Weibull e evidências físicas para determinar as causas da quebra frequente do sistema de bomba centrífuga durante os últimos anos. A motivação do trabalho foi demonstrar objetivamente que uma abordagem focada na confiabilidade, disponibilidade e capacidade de manutenção ajudaria a detectar peças, equipamentos e sistemas que requeiram melhorias para gerentes de manutenção tomarem a decisão certa.

No estudo de FERNANDO VICENTE (2011) foram detectadas várias quantidades de partículas sólidas na corrente de gás principal, fazendo com que os selos mecânicos da bomba falhem e causem quebras no sistema. A maioria destas partículas sólidas permaneceram no interior da tubulação durante a montagem da fábrica e foram a causa das falhas do sistema da bomba centrífuga. Nos últimos, o sistema de bombas centrífugas sofreu algumas avarias devido a fugas através da vedação mecânica. No entanto, não havia partículas sólidas no fluxo de gás principal que pudessem afetar a lubrificação da face do selo. Havia apenas evidência física na vedação mecânica com marcas de funcionamento a seco (falta de fluido para lubrificação facial). A análise dos 5 porquês concluiu que as condições de funcionamento do gás no sistema da bomba centrífuga mudaram - pressão e temperatura ficaram instáveis - afetando a lubrificação do selo mecânico. Por esse motivo, uma análise Weibull foi realizada.

Após a análise de Weibull realizada nos selos mecânicos de duas bombas, FERNANDO VICENTE (2011) identificou uma falha aleatória (pode ser causada devido à variação dos parâmetros do processo) e a outra falha ocorrendo na zona de mortalidade infantil da curva de banheira (pode ser causada por uma combinação de condição variável do processo, ou seja, pressão e temperatura, falta de procedimentos de manutenção e ou uma condição mecânica ruim da vedação do eixo). Por fim, FERNANDO VICENTE (2011) fez uma comparação entre os parâmetros de Weibull do selo mecânico de ambas as bombas contra um selo mecânico típico na indústria de petróleo e gás e concluiu que a vida útil do selo mecânico analisado no trabalho era significativamente menor do que uma vedação mecânica típica ( $\beta = 1,4$  e  $\eta = 25.000$  horas).

Por fim, outra alternativa para eliminar os problemas de vazamentos é a substituição das bombas tradicionais por bombas que não utilizam os selos mecânicos. Estes equipamentos - magnéticos ou herméticos - são fabricados pela empresa de equipamentos industriais ALEF. Embora as bombas sem selos mecânicos sejam mais caras do que as bombas com selos, estudos de viabilidade podem ser feitos para calcular o custo do retrofit em relação à substituição por um novo equipamento, analisando um cenário a médio e longo prazo.

## 2.2 Informações técnicas sobre as bombas d'água

As especificações técnicas das bombas d'água utilizadas neste trabalho foram fornecidas por especialistas responsáveis pela manutenção destes ativos, por manuais técnicos e catálogos de peças da General Electric.

As bombas d'água do motor Diesel GE 17FDL estudadas são fabricadas pela empresa General Electric e são do tipo centrífuga com impulsor aberto (Figura 3). A bomba fica instalada na tampa da extremidade livre do motor Diesel e faz circular água por todo o sistema de resfriamento, como descrito no Manual de Instruções da Bomba D'água do Motor Diesel da GENERAL ELECTRIC. O eixo da bomba é acionado por engrenagens (Figura 4) da extremidade livre do virabrequim. A bomba é fixada na tampa da extremidade livre por parafusos no flange o qual faz parte do corpo da bomba. O encaixe entre o flange da bomba e a tampa da extremidade livre assegura o correto alinhamento entre as engrenagens.

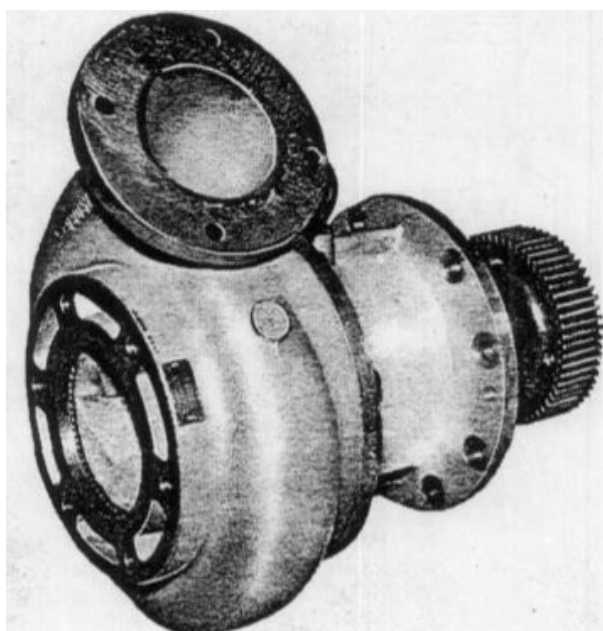


Figura 3 – Vista exterior da bomba d'água [7]

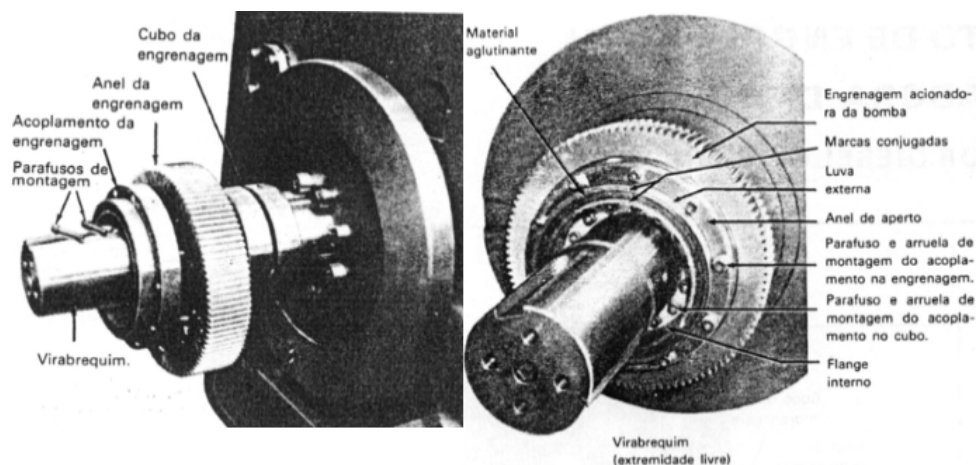


Figura 4 – Conjunto de engrenagens acionadoras da bomba [8]

O Manual de Instruções da Bomba D'água do Motor Diesel descreve o eixo de acionamento da bomba, que gira sobre dois rolamentos que estão prensados no eixo e submersos no óleo lubrificante contido no cárter. São usados dois retentores de tipos diferentes para manter a água de resfriamento e o óleo lubrificante em seus respectivos sistemas. O retentor de óleo lubrificante é um corpo metálico prensado contendo um anel retentor de borracha reforçado com uma mola. O anel de borracha gira sobre a luva que se estende junto da pista interna do rolamento. O retentor de água contém um anel de carvão carregado por mola que gira contra um anel de aço temperado e vedado por anéis "O" de borracha. Um anel de borracha (anel desviador) é montado no eixo e gira numa câmara que contém no fundo um orifício denunciador. A água ou o óleo que vazarem pelos respectivos retentores serão drenados pelo orifício denunciador.

A Figura 5 e a Tabela 1 ilustra e descreve, respectivamente, o conjunto da bomba d'água.

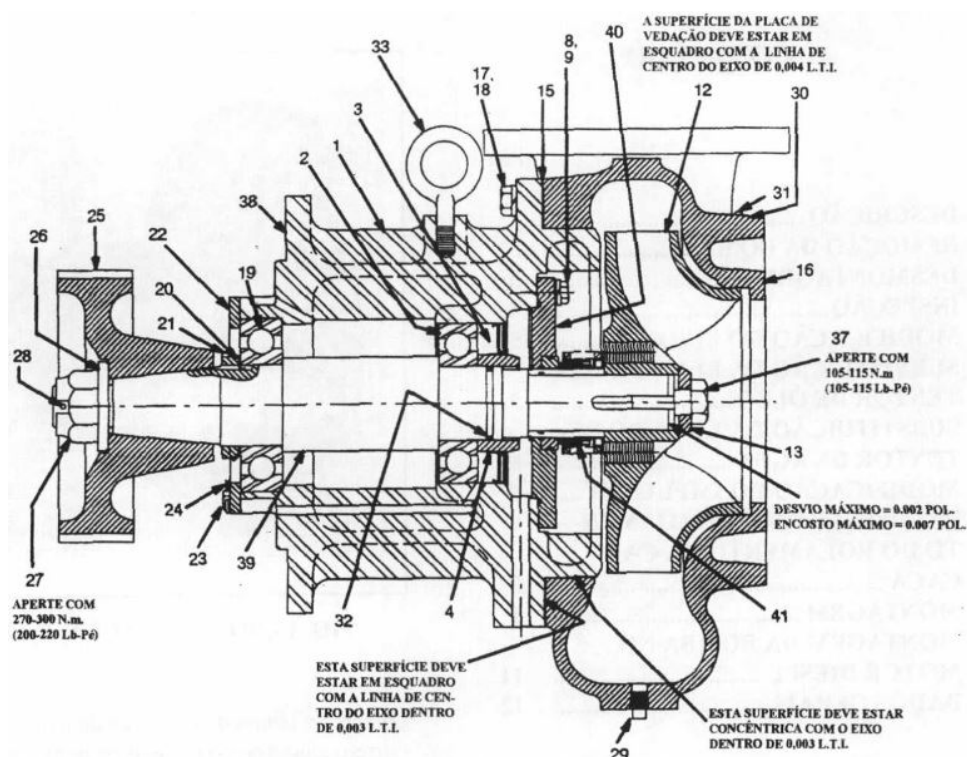


Figura 5 – Conjunto da bomba d'água [7]

REF.	DESCRIÇÃO	REF.	DESCRIÇÃO
1	CARCAÇA	23	PARAFUSO
2	ROLAMENTO	24	ARAME PARA TRAVAMENTO DE 1.5X920 MM
3	RETENTOR DE ÓLEO	25	ENGRENAGEM
4	LUVA	26	ARRUELA
8	ARRUELAS DE PRESSÃO DE 3/8 POL.	27	PORCA-CASTELO 1-1/2-12
9	PARAFUSO SEXTAVADO 3/8-16x1-1/8 POL.	28	CONTRA-PINO DE 1/8X2.5 POL.
12	IMPULSOR	29	TAMPÃO 1/4 NPTF
13	ARRUELA	30	PLACA DE IDENTIFICAÇÃO
15	JUNTA	31	PARAFUSO AUTO-ATARRAXANTE N° 4X1/4'
16	ALOJAMENTO DO IMPULSOR	32	ANEL "O"
17	ARRUELA DE PRESSÃO DE 1/2 POL.	33	OLHA DE IÇAMENTO DE 1/2-13 FIOS
18	PARAFUSO DE 1/2-13X1-1/2 POL.	37	PARAFUSO 3/4-10 X 1-3/4 POL.
19	ROLAMENTO	38	CARCAÇA
20	ARRUELAS DE PRESSÃO	39	EIXO
21	PORCA DO ROLAMENTO	40	PLACA DE VEDAÇÃO
22	PLACA DE FIXAÇÃO	41	RETENTOR DE ÁGUA

Tabela 1 – Descrição do conjunto da bomba d'água [7]

A Figura 6 e a Tabela 2 ilustra e descreve, respectivamente, as peças separadas da bomba d'água.

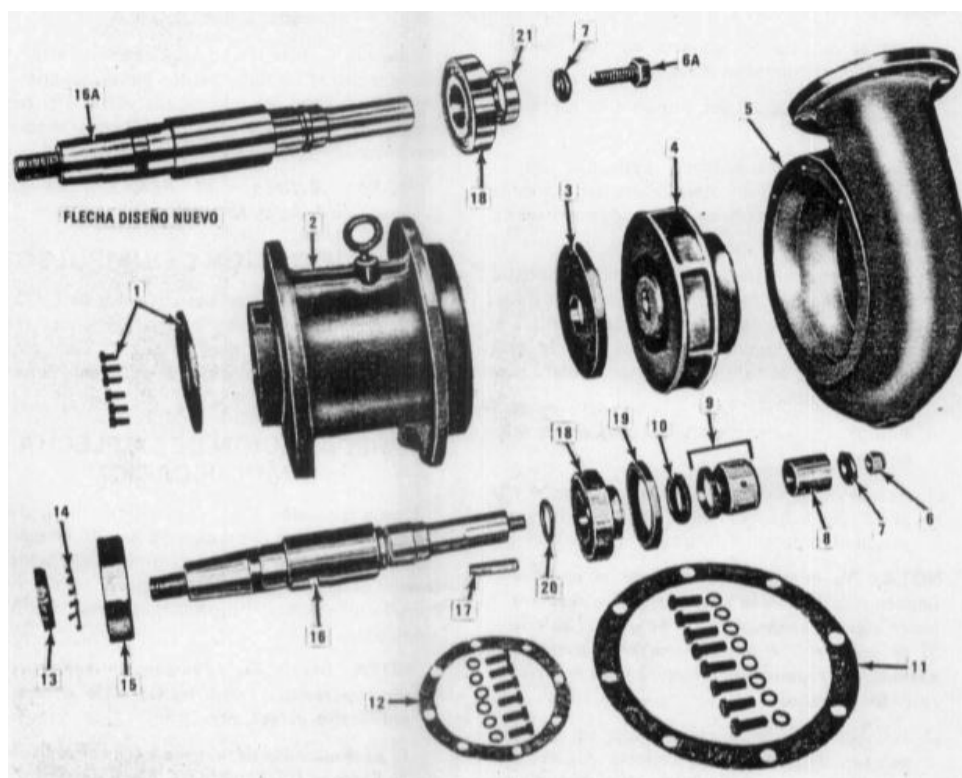


Figura 6 – Conjunto da bomba d'água mostrando as peças separadas [6]

REF.	DESCRIÇÃO	REF.	DESCRIÇÃO
1	PLACA DE RETENÇÃO DO PARAFUSO E ROLAMENTO	12	JUNTA DA PLACA DE VEDAÇÃO E PARAFUSOS
2	CARÇAÇA DO ROLAMENTO	13	PORCA
3	PLACA DE VEDAÇÃO	14	ARRUELA
4	IMPULSOR	15	ROLAMENTO
5	ALOJAMENTO DO IMPULSOR	16	EIXO
6	PORCA DE ACIONAMENTO PARA O EIXO	16A	EIXO
6A	PARAFUSO DO IMPULSOR PARA O EIXO	17	CUNHA DO IMPULSOR
7	POLIA DO IMPULSOR	18	ROLAMENTO
8	ARBUSTO DO EIXO	19	RETENTOR DE ÓLEO
9	CONJUNTO DO RETENTOR DE ÁGUA	20	ANEL "O"
10	ANEL DE BORRACHA	21	ARBUSTO
11	JUNTA DO ALOJAMENTO E PARAFUSOS		

Tabela 2 – Descrição do conjunto da bomba d'água mostrando as peças separadas [6]

As bombas utilizadas neste estudo não são normatizadas. Elas trabalham em regime contínuo e possuem o acionamento pelo motor diesel. Portanto, a rotação da bomba é em função da rotação do motor. Não existe sistema para atenuar a vibração do motor na bomba. A pressão mínima das bombas é de 4 psi a 450 RPM e a máxima é 45 psi a 1050 RPM (rotação do motor diesel). A temperatura de trabalho do fluido varia entre 80 e 90°C, aponta o especialista responsável pelas bombas d'água dos dados fornecidos.

Segundo este especialista, os modos de falha mais comuns encontrados para as bombas d'água são: quebra do rolamento do lado da engrenagem, falha do selo, selos

ressecados por alto tempo de operação (comum em locomotivas onde a bomba não sai por tempo, mas por consumo) e soltura do parafuso de fixação do impulsor (modo de falha já mitigado com a substituição do modelo de parafuso). As falhas levam aos vazamentos nas bombas d'água, que ocorrem durante a operação (condição dinâmica), pelas faces do selo mecânico e pelo rolamento. Na partida, o microprocessador impede o funcionamento do motor diesel se não houver a pressão adequada de bombeamento.

A Figura 7 mostra o kit do selo mecânico utilizado nas bombas d'água.



Figura 7 – Kit do selo da bomba d'água

Os selos mecânicos são os componentes mais críticos das bombas d'água, pois são os principais responsáveis pelas falhas destes equipamentos, aponta o especialista. A Figura 8 relaciona as principais causas, segundo registros de manutenção da empresa que forneceu os dados, das falhas nos selos mecânicos. 90% das causas são atribuídas ao material do próprio selo mecânico, que não suporta as condições em que fica exposto no interior das bombas.

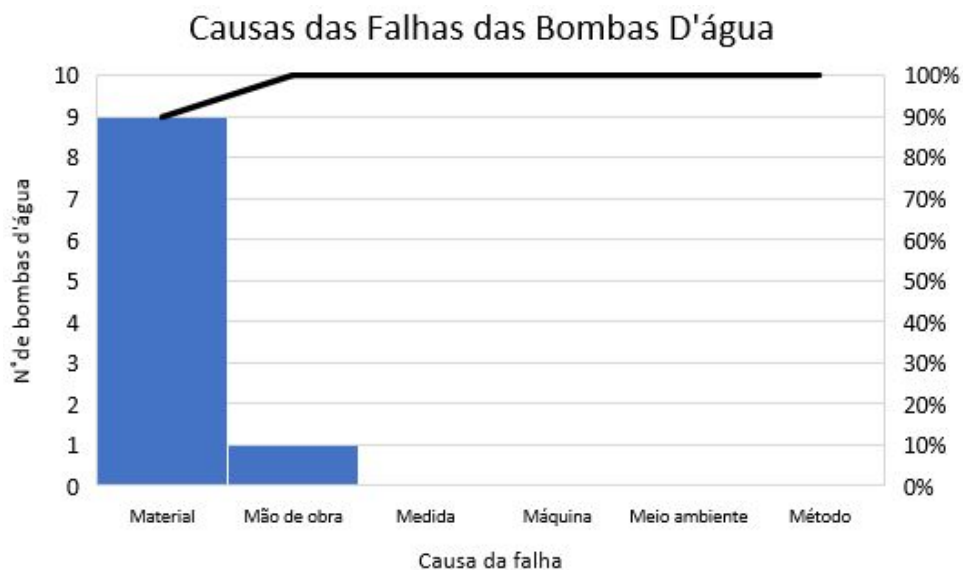


Figura 8 – Método dos 6M para apontar as causas das falhas das bombas d'água

A empresa dos equipamentos analisados realiza manutenção nas locomotivas em intervalos mínimos de 90 dias e máximo de 900 dias, dependendo do modelo do veículo. Para as manutenções, os fornecedores exigem a retirada total do óleo lubrificante, são 1.500 litros. Considerando o valor do litro do óleo pago pela empresa como 7 reais, o custo apenas com este insumo é de aproximadamente 10.500 reais. Ainda são necessárias mais de 8 horas de mão de obra para a realização deste serviço. Em alguns casos, o óleo retirado das bombas após a manutenção é analisado e, caso não apresente contaminações, é reutilizado.

A GE sugere uma ficha de verificação para manutenção das bombas d'água, que se encontra no ANEXO A.

### 3 METODOLOGIA

A condição necessária para a realização da análise de falhas convencional é que os ativos estudados possuam um banco de dados com informações de manutenção suficientemente adequadas. Neste caso foram coletados dados históricos referentes à falhas das bombas d'água nos últimos cinco anos, no período de 2014 à 2018.

O banco de dados foi organizado de forma a possibilitar o cálculo do tempo entre falhas. A Tabela 3 apresenta uma amostra dos tempos entre falhas e o equipamento que falhou.

LOCOMOTIVA	DATA DA RETIRADA	DESCRIÇÃO
907319	04/12/2016	BOMBA D'ÁGUA
907319	23/01/2017	BOMBA D'ÁGUA
907319	11/04/2017	BOMBA D'ÁGUA
907302	12/06/2017	BOMBA D'ÁGUA
907302	09/09/2017	BOMBA D'ÁGUA
907259	13/09/2016	BOMBA D'ÁGUA
907259	22/08/2017	BOMBA D'ÁGUA
907243	22/02/2016	BOMBA D'ÁGUA
907243	16/09/2017	BOMBA D'ÁGUA
907241	18/06/2016	BOMBA D'ÁGUA
907241	03/09/2017	BOMBA D'ÁGUA

Tabela 3 – Ocorrências de falhas nas bombas d'água

Além dos intervalos de manutenção, obteve-se o registro do abastecimento de diesel das locomotivas que apresentaram alguma falha relacionada às bombas d'água. O consumo de diesel é um indicador importante para se quantificar a geração de potência dos motores das locomotivas. O ciclo de vida das bombas d'água, segundo fornecedor, é de 2.5 milhões de litros de diesel. Dessa forma, pode-se comparar os intervalos entre as falhas com o consumo de diesel (coluna Reading da Tabela 4, em litros) pelas locomotivas e verificar se o ciclo de vida informado pelo fornecedor foi atendido.

A Tabela 4 apresenta uma amostra dos registros de abastecimento de uma locomotiva.

ITEM	SERIAL	READING	READING DATE	COUNTER
LOCOMOTIVA GE	903407	7611	17/09/2018	LITROS ÓLEO DIESEL
LOCOMOTIVA GE	903407	1501	13/09/2018	LITROS ÓLEO DIESEL
LOCOMOTIVA GE	903407	9600	11/09/2018	LITROS ÓLEO DIESEL
LOCOMOTIVA GE	903407	7628	08/09/2018	LITROS ÓLEO DIESEL
LOCOMOTIVA GE	903407	3646	06/09/2018	LITROS ÓLEO DIESEL
LOCOMOTIVA GE	903407	5501	04/09/2018	LITROS ÓLEO DIESEL
LOCOMOTIVA GE	903407	8801	02/09/2018	LITROS ÓLEO DIESEL
LOCOMOTIVA GE	903407	4600	30/08/2018	LITROS ÓLEO DIESEL
LOCOMOTIVA GE	903407	7500	29/08/2018	LITROS ÓLEO DIESEL
LOCOMOTIVA GE	903407	10500	25/08/2018	LITROS ÓLEO DIESEL

Tabela 4 – Registros de abastecimento da locomotiva 903407



Após o pré-tratamento dos dados, foi utilizado o software STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.11 para modelagem de confiabilidade e manutenibilidade, utilizando os conceitos da análise de dados de vida (life data analysis).

Através dos dados dos intervalos entre as falhas das bombas d'água, calculou-se as funções densidade de probabilidade acumulada (equação 2.9), densidade de probabilidade (equação 2.7), sobrevivência (equação 2.8) e risco (equação 2.10) da distribuição de Weibull.

A função de distribuição acumulada  $F(t)$  (Equação 2.9) foi utilizada para verificar se a distribuição de Weibull é considerada adequada para os dados utilizados neste estudo. Ao aplicar o procedimento de regressão nesta distribuição, foram determinados os parâmetros da reta  $\beta$  e  $\eta$ .

A análise de dados de vida tradicional envolve a modelagem da variável aleatória tempo até a falha. A partir desta análise é possível determinar o comportamento de falha das bombas d'água. A distribuição de probabilidade escolhida para se ajustar aos dados do tempo de vida do sistema foi a de Weibull. Projeta-se o procedimento de análise de Weibull para ajustar uma distribuição de Weibull a um conjunto de 50 observações que, através dos parâmetros  $\beta$  e  $\eta$  encontrados, a função densidade de probabilidade de Weibull foi calculada (Equação 2.7).

O número mínimo de bombas d'água ( $n$ ) necessário para a realização do estudo de confiabilidade foi calculado pela equação 2.12. As probabilidades do sucesso ( $p$ ) e do insucesso ( $q$ ), como não são conhecidas, a literatura recomenda usar o valor de 0.5, que corresponde a 50% de chance. O número total de bombas ( $N$ ) é 350. O valor crítico resultante do grau de confiança ( $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ ) para uma confiança de 90%, segundo a tabela da normal dada por TRIOLA (2002), é 1.645. Para uma margem de erro ( $E$ ) de 5%, usa-se 0.11. Substituindo estes valores na equação 2.12, o valor de  $n$  é 48.32. Portanto, o número mínimo da amostra necessária para este estudo, nas codições determinadas, é 49.

Conforme foi colocado por ANGELYNA FAGUNDES (2011), a distribuição da função densidade de probabilidade de Weibull tem dois parâmetros importantes:  $\beta$  é chamado de parâmetro de forma porque define a forma dessa distribuição e  $\eta$  é o parâmetro de escala que define o espalhamento da distribuição. O parâmetro  $\beta$  representa o padrão de falha do componente em estudo. Para  $\beta < 1$  a peça está falhando no início da vida. Para  $\beta = 1$  a taxa de falha é constante e a peça está falhando na seção de vida útil da curva da banheira (Figura 2) e para  $\beta > 1$  a peça ou componente analisado está falhando devido ao desgaste.

Os percentis são calculados encontrando o último intervalo para o qual uma função de sobrevivência estimada no início do intervalo é maior ou igual à porcentagem desejada, e então interpolado sobre o intervalo para encontrar o percentil desejado. O intervalo de confiança aproximado com o erro padrão também foram calculados. O erro padrão dos

percentis fornece uma ideia do quão bem os valores tem sido estimados em função dos dados disponíveis, aponta STATPOINT TECHNOLOGIES, INC. (2009).

Por meio desta análise quantitativa determinou-se o comportamento das falhas em bombas d'água e, juntamente com o estudo bibliográfico, foi possível supor as causas mais prováveis desta condição indesejada.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

As análises a seguir foram realizadas com base nos dados disponíveis, e refletem apenas aquilo que foi informado, sem nenhuma subjetividade ou aproximações.

Os dados de consumo de combustível das locomotivas foram organizados no gráfico de pareto (Figura 9).

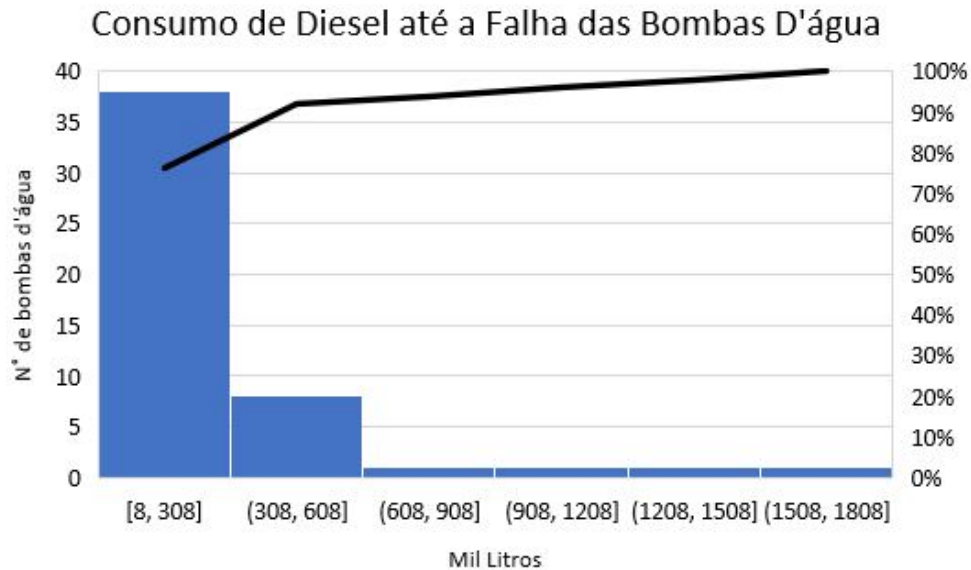


Figura 9 – Consumo de diesel até a falha

Analisando o gráfico da Figura 9, 95% das bombas d'água que falharam consumiram até 308 mil litros de combustível. As bombas foram retiradas das locomotivas antes de performarem o ciclo esperado de vida de 2.5 milhões de litros de diesel. Todas elas foram retiradas em caráter corretivo e não preventivo.

A Tabela 5 contém os dados de um teste de vida em 50 bombas d'água e apresenta os resultados das funções estimadas de densidade de probabilidade acumulada (equação 2.9), risco (equação 2.10) e densidade de probabilidade (equação 2.7) da distribuição de Weibull dentro de cada intervalo. Os registros foram mantidos tabulando o número de bombas que falharam durante cada período de 50 dias.

INTERVALO	NÚMERO DE FALHAS	DENS. DE PROB. ACUMULADA	RISCO	DENS. DE PROB.
0.0-50.0	16	1.000000	0.003810	0.003478
50.0-100.0	17	0.826087	0.006667	0.004720
100.0-150.0	2	0.590062	0.001250	0.000715
150.0-200.0	7	0.554301	0.006087	0.002928
200.0-250.0	1	0.407882	0.001333	0.000526
250.0-300.0	1	0.381567	0.001538	0.000565
300.0-350.0	2	0.353303	0.004000	0.001285
350.0-400.0	0	0.289066	0.000000	0.000000
400.0-450.0	1	0.289066	0.002857	0.000771
450.0-500.0	0	0.250524	0.000000	0.000000
500.0-550.0	0	0.250524	0.000000	0.000000
550.0-600.0	1	0.250524	0.004000	0.000911
600.0-650.0	0	0.204974	0.000000	0.000000
650.0-700.0	0	0.204974	0.000000	0.000000
700.0-750.0	1	0.204974	0.006667	0.001171
750.0-800.0	0	0.146410	0.000000	0.000000
800.0-850.0	1	0.146410	0.020000	0.001952
TOTAL	50			

Tabela 5 – Tabela de vida das bombas d'água calculada pelo STATGRAPHICS

De acordo com a Tabela 5, 16 bombas falharam entre 0 e 50 dias. 17 falharam após mais de 50, mas menor ou igual a 100 dias. A tabela inteira contém 17 intervalos até 850 dias-inclusive. Os intervalos são adjacentes uns aos outros, isto é, o limite inferior de um intervalo é o limite superior do intervalo que o precede. As colunas na tabela contêm informações sobre cada um dos intervalos. Cada intervalo é assumido como sendo fechado na extremidade superior, isto é, o primeiro intervalo corresponde a tempos para os quais  $0 < t \leq 50$ . Assume-se ainda que os tempos de falha são igualmente prováveis de terem ocorrido em qualquer lugar dentro do intervalo.

A distribuição de Weibull foi plotada para os dados das 50 bombas d'água e os percentis estimados foram exibidos.

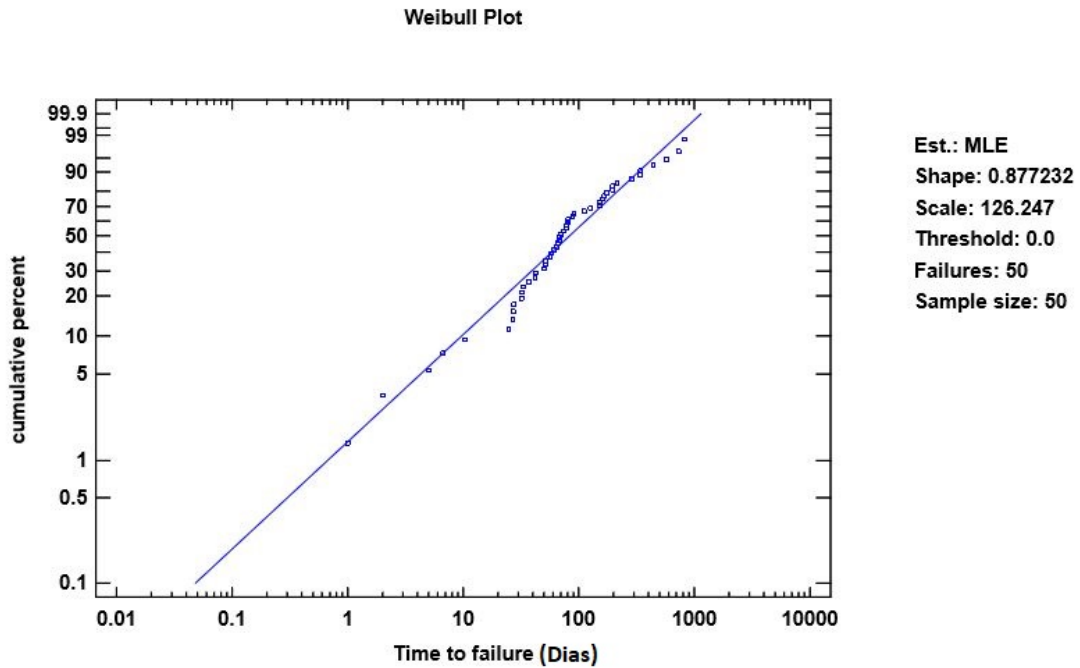


Figura 10 – Distribuição de Weibull

Os pontos do gráfico da Figura 10 são os percentis estimados com base em um método não paramétrico. A reta é a função de densidade de probabilidade acumulada (equação 2.9) linearizada. Como os percentis se ajustaram aproximadamente ao longo da reta, a distribuição de Weibull é considerada adequada para os dados de falha das bombas analisados. Observa-se que o gráfico de probabilidade descreve adequadamente os dados de tempo entre falhas. Os tempos de falha são logaritmicamente dimensionado em um eixo horizontal X.

A Figura 10 apresenta os resultados dos parâmetros  $\beta$  (Shape) e  $\eta$  (Scale). O parâmetro  $\gamma$  (Threshold) é definido como 0, resultando na distribuição Weibull de 2 parâmetros.

O parâmetro de forma  $\beta$  calculado foi 0.877. Para valores menores do que um, as falhas são consideradas como mortalidade infantil ou falha prematura. A vida característica  $\eta$  calculada das bombas d'água foi 126.25, e representa o intervalo de tempo, em dias, no qual 63.2% das falhas ocorrem. Portanto, a partir do dia 127 restaram 36.8% das bombas sem falhar.

O painel de percentil, Tabela 6, mostra os tempos estimados no qual dadas porcentagens de um item ainda estarão funcionando:

PERCENTILE	ESTIMATE	STANDARD ERROR
75.0	66.1184	13.7317
50.0	168.543	33.168
25.0	550.575	234.031

Tabela 6 – Tabela de percentis calculada pelo STATGRAPHICS

A Tabela 6 estima que 25% das bombas ainda estariam operando após 550 dias. Para um intervalo de confiança aproximado de 95% tem-se que:

$$550 \pm 1.96(234)$$

ou

$$550 \pm 458 \text{ dias.}$$

A base de dados utilizada foi pequena e apresenta alto desvio padrão, o que explica o valor elevado do erro.

A Figura 11 apresenta o histograma de frequência, com a distribuição das observações, juntamente com a função de densidade de probabilidade estimada (equação 2.7):

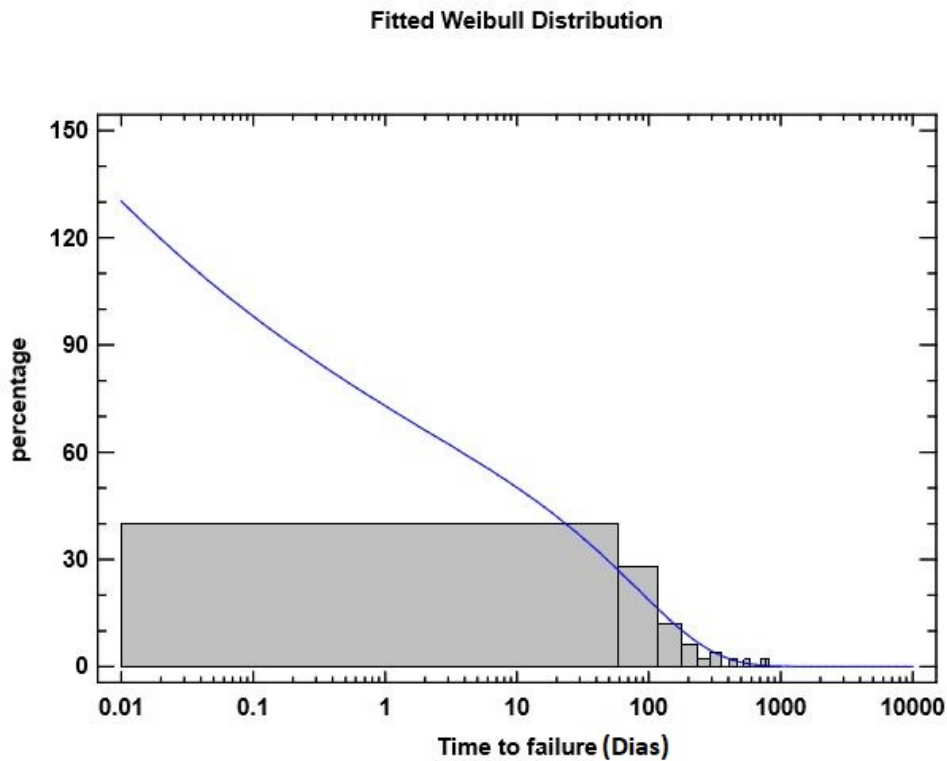


Figura 11 – Frequência das distribuições e Função Densidade de Probabilidade

A função densidade de probabilidade (equação 2.7) é usada para determinar a

probabilidade de o tempo de falha de um item ficar dentro de um intervalo especificado. Para pequenos bancos de dados, a curva não é muito suave.

Comparando a Figura 11 com a Figura 1, que mostra a variação ocasionada pelo parâmetro  $\beta$ , a curva das bombas d'água analisadas possui  $\beta$  entre 0.5 e 1.0. O comportamento dos dados analisados, para um valor de  $\beta < 1$ , está de acordo com o encontrado na literatura (Figura 1).

Ainda, para valores de  $\beta < 1$ , a função densidade de probabilidade apresenta frequências elevadas de falha na parte inicial da vida, corroborando com a curva da banheira na Figura 2. Este tipo de falha é denominada de falhas prematuras e pode estar associado a defeitos originados no projeto do equipamento, na instalação ou na operação. De fato, conforme a Figura 11, a maior probabilidade de uma bomba falhar ocorre entre 0 e 60 dias, com 40% de chance.

A Função de Sobrevivência (equação 2.8) mostra a probabilidade estimada de que um item sobreviverá até o momento  $t$  (Figura 12).

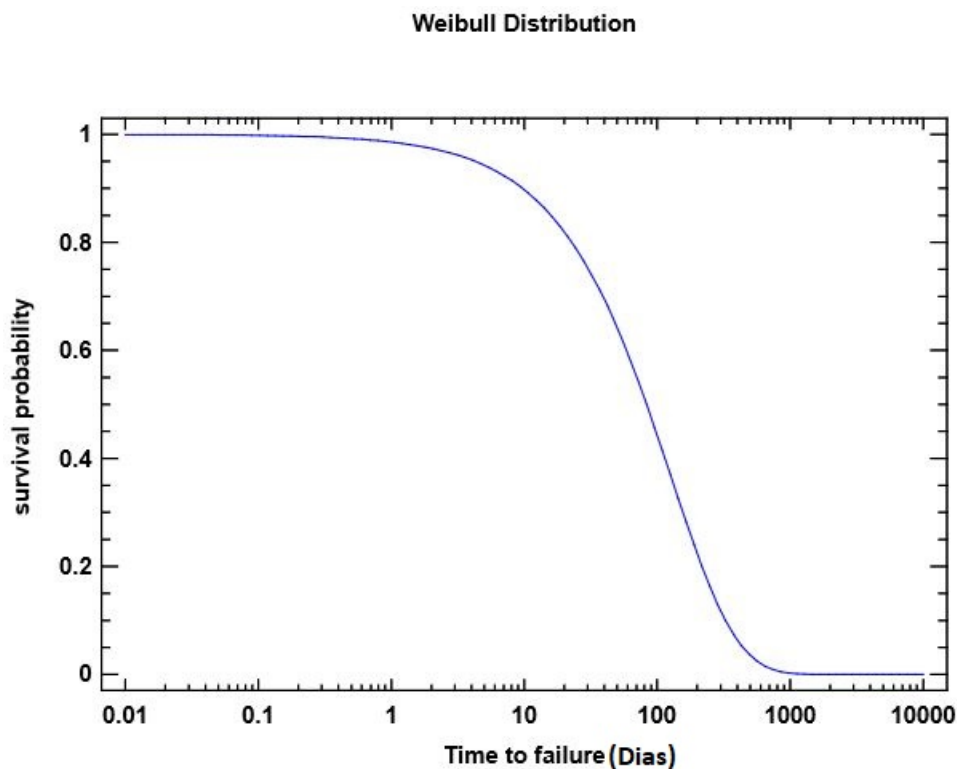


Figura 12 – Função de Sobrevivência

A função diminui de 1.0 para 0.0 em grandes valores de  $X$ .

De acordo com o gráfico da Figura 12, a probabilidade de que os componentes sobrevivam até o centésimo dia é de 50%. Portanto, no cenário atual dos ativos analisados, para que a manutenção preventiva ocorra antes das falhas, ela deve acontecer em um

intervalo máximo de 50 dias.

A Figura 13 representa o gráfico da função de risco (equação 2.10), que fornece uma estimativa da taxa instantânea de falha:

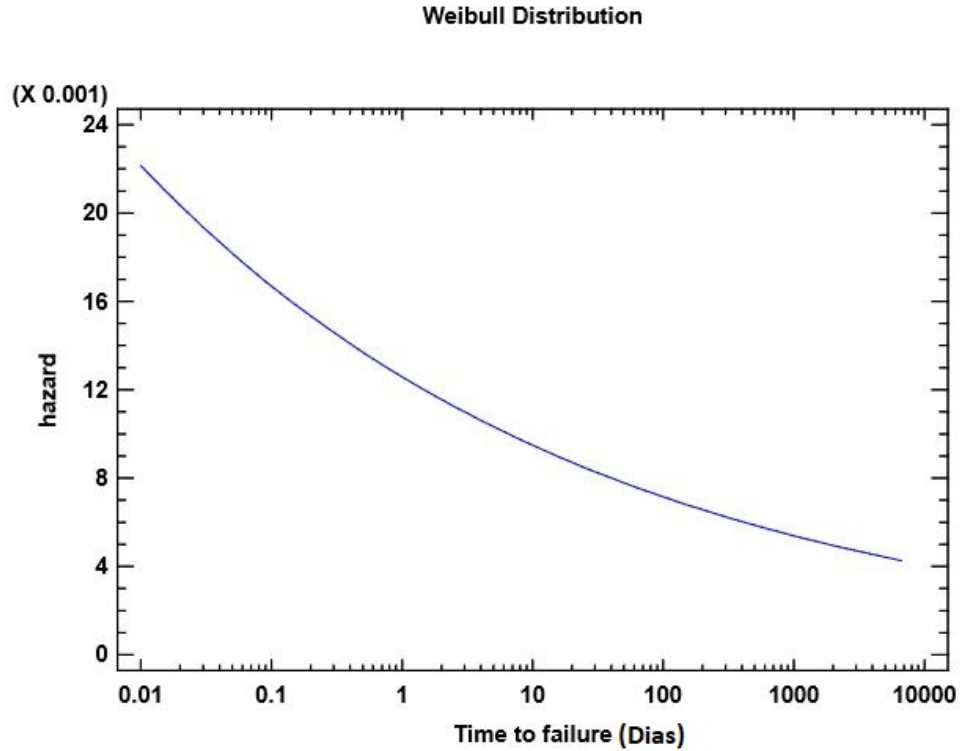


Figura 13 – Função de Risco

As unidades da função de risco são a fração de itens que falharam por unidade de tempo. Como o parâmetro de forma estimado  $\beta < 1$ , a função de perigo foi monotonicamente decrescente. Esse padrão pode ser interpretado como um risco elevado de falhas no início de vida dos componentes, sendo estes menos propensos a falhar com a idade.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

A Análise de Dados de Confiabilidade e Vida (Weibull Analysis) usando o software STATOGRAPHICS demonstrou ser consistente para se determinar os padrões de falha das bombas d'água e projetar uma estratégia de manutenção preliminar. Porém, para garantir um diagnóstico mais preciso, é necessária uma análise microscópica extensiva dos componentes das bombas que falharam, em vez de um simples exame visual. Identificada a causa raiz, ações corretivas podem ser tomadas focando no problema específico do componente.

Todos os modos de falha mapeados para as bombas d'água descritos pelo especialista da empresa fornecedora dos dados estão presentes em diversos segmentos de empresas. O estudo bibliográfico revelou os mesmos padrões em diversas setores, incluindo ferrovias. Através de um contínuo benchmarking feito entre empresas que utilizam os mesmos ativos pode-se resultar em soluções muito mais rápidas e baratas. Ressalta-se a importância de um estudo de confiabilidade e compartilhamento de estratégias de manutenção entre as empresas que possuem ativos similares e que, geralmente, apresentam os mesmos problemas.

Observou-se que o cálculo da disponibilidade pode ser um indicador para ações de manutenção. Através do estudo de confiabilidade, mapeou-se o intervalo mais provável das falhas acontecerem e, assim, foi possível planejar uma ação específica para minimizar o risco de falha da bomba. O intervalo estimado para manutenção preventiva ainda ficou abaixo do desejado, apesar de estar dentro do esperado, sabendo-se da atual condição das bombas estudadas. O intervalo mínimo de 50 dias necessário entre as manutenções não é economicamente viável para a empresa, considerando um custo aproximado da troca de todo o óleo lubrificante de 10.500 reais mais as 8 horas de mão de obra necessárias para a realização deste serviço.

Com base nos resultados da análise de confiabilidade, no estudo das principais causas de falhas precoces encontradas na literatura e na descrição das falhas feitas pelos mantenedores das oficinas, supõe-se que as falhas precoces nas bombas d'água ocorrem devido ao material do selo mecânico. De acordo com a literatura, este tipo de falha ocorre devido a diferenças entre os parâmetros operacionais e os parâmetros para os quais o selo mecânico foi projetado. Devido a estas diferenças, pequenas mudanças nas condições de operação podem afetar o desempenho do componente, resultando em danos à vedação do eixo. Temperaturas elevadas e cargas químicas ou mecânicas severas acima do que os selos foram projetados para suportar reduzem a expectativa de vida útil da vedação. Acima de certos limites, ocorrerão rapidamente degeneração e mau funcionamento deste componente. A solução sugerida é a escolha de um novo modelo de selo mecânico projetado para suportar as condições de pressão, vazão, temperatura e vibração no qual estes são

submetidos dentro da bomba d'água.

Sugere-se ainda criar uma política de manutenção mais focada na provável causa raiz do problema, que são as falhas de material, afim de aumentar a disponibilidade dos ativos mais críticos.

O processo completo de manutenção de uma bomba d'água consiste na análise prévia dos parâmetros, na manutenção preditiva e no registro das informações, que devem estar organizadas e certificadas para uma análise estatística com elevado grau de confiança. Porém, os dados das 50 bombas d'água utilizados para o estudo de confiabilidade no presente trabalho não foram suficientes para garantir a acurácia desejada. O erro elevado das análises se justifica pela quantidade e qualidade dos dados utilizados. Assim, para trabalhos em confiabilidade e modelagem de falhas com acurácia mais elevada é importante a utilização de bancos de dados mais densos e consistentes, independentemente do software ou ferramenta utilizados para a gestão da manutenção.

Ainda que os resultados encontrados tenham caráter preliminar, estes podem servir como subsídio para estudos futuros e contribuir para a realização de investimentos de forma mais consciente e palpável.

### 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para possível continuidade da pesquisa, percebe-se a necessidade da utilização de mais dados para análise.

Sugere-se também aliar o estudo de confiabilidade com testes em bancada para extressar as bombas d'água até a falha. Dessa maneira, seria possível determinar os limites mecânicos dos componentes das bombas d'água e, assim, selecionar os melhores modelos. Somente através de um viés mais técnico, serão definidos os parâmetros reais das bombas d'água utilizadas e comparar com as informações fornecidas pelo fornecedor. Sugere-se análises laboratoriais dos componentes mais críticos, principalmente dos selos mecânicos. A partir destas informações, os fornecedores poderão ser questionados pelas falhas precoces recorrentes.

Por fim, pode-se tratar sobre os custos atuais de manutenção comparados a um cenário após implementação das melhorias discutidas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] ANGELYNA M. FAGUNDES, ANDRE L. S. ROCHA, SIMONE R. BARBOSA, ALESSANDRA L. CARVALHO, *Estudo de caso: Análise Quantitativa de Confiabilidade e Disponibilidade de um Torno CNC, Baseado na Metodologia RCM (Reliability Centred Maintenance), Aplicado a Área de Manutenção Industrial*. XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2011.
- [2] B.W. TURNBULL, *The Empirical Distribution Function with Arbitrarily Grouped, Censored and Truncated Data* Journal of the Royal Statistical Society, 38, 290-295, 1976.
- [3] DALE M. ASHBY, *Diagnosing Common Causes of Sealing Failures*. Parker Hannifin Corp. 2005.
- [4] FERNANDO VICENTE, *Reliability Analysis of Centrifugal Pumps System Justifies Improvements in Gas Plant*. ABB Service, Argentina, 2011.
- [5] IME, MRS, *CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA*. 2008.
- [6] GENERAL ELECTRIC, *Instrucciones. Bomba de Agua*.
- [7] GENERAL ELECTRIC, *Manual de Instruções. Bomba D'água do Motor Diesel*.
- [8] GENERAL ELECTRIC DO BRASIL S.A., *Manual de Instruções. Conjunto de Engrenagem Acionadora da Bomba. Motor Diesel GE 17FDL*. Departamento de Locomotivas.
- [9] GENERAL ELECTRIC TRANSPORTATION, *Manutenção de Bomba D'água. Motor Diesel 7FDL*.
- [10] GRUNDFOS MANAGEMENT, *Mechanical Shaft Seals for Pumps*. 2009.
- [11] JASBIR SINGH, SURJIT ANGRA, *Failure Mode Analysis of Mechanical Seals*. Vinod Kumar Mittal Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Journal of Engineering and Technology, Vol 2, Kurukshetra, India 2012.
- [12] MICHAEL HUEBNER, *Improving the Reliability of Mechanical Seals*. Flowserve Corp., Cep Magazine, 2005.
- [13] MOHAMMED IRFAN ALI, *Reliability and Life Data Analysis on the Components of Pump*. Saudi Journal of Engineering and Technology, Vol-2, p. 300-304, Al-Jubail, Saudi Arabia, 2017.
- [14] STATPOINT TECHNOLOGIES, INC., *Statgraphics Centurion XVI User Manual*. USA, 2009.
- [15] TRANSPORTATION SAFETY BOARD OF CANADA, *Railway Investigation Report R09H0010*. Richmond, Ontario, Canada, 2009.
- [16] TRIOLA F. M., *Essentials of Statistics*. Dutchess Community College, Pearson, 2002.

- [17] VUGAR A. MAMMADOV, AGIL YUSIFOV, KEN P. TACON, *Upstream Pumping Technology in Centrifugal Pump Mechanical Sealing Applications - Field Experience with High Duty Sea Water Injection Pumps*. Proceedings of the Twenty-sixth International Pump Users Symposium, 2010.

## ANEXO A – Ficha de verificação sugerida pela GE para manutenção das bombas d'água

Figura 14 – Ficha de verificação sugerida pela GE para manutenção das bombas d'água [9]

7FDL	Furo Testemunho		Movimento do eixo			Rolamento Traseiro (Engrenagem)			Rolamento Frente			Selo de Óleo				Caracol / Impulsor		Selo de Água		Cavidade entre Selos	
	Resíduo Água	Resíduo Óleo	Rotação Suave	Dificuldade p/ Girar	Roçando	Suave	Roçando / Desgaste	Folga para eixo	Suave	Roçando / Desgaste	Gaiola Danificada	Ranhuras Excessivas	O-ring Endurecido / Quebrado	Quebrado / Frágil	Selo For a do Lugar	Impeler Avariado	Impeler Atritando na entrada	Modelo - P3, P5, P6, P8		Resíduo de Óleo	Corrosão / Água
Entrada Serviço						Observações															
Data Avaria																					
Mwhrs Acumulado																					

**ANEXO B – TERMO DE AUTENTICIDADE****UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA****Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria**

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral<sup>1</sup> e criminais previstas no Código Penal<sup>2</sup>, além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 15 de Outubro de 2018.

---

Gustavo Presto de Oliveira – Discente  
Matrícula: 201271099 – CPF: 107.196.386-40

<sup>1</sup> LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

<sup>2</sup> Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.

**ANEXO C – DECLARAÇÃO DA EMPRESA**

Declaro para os devidos fins, que Gustavo Presto de Oliveira, estagiário da empresa MRS Logística S.A. possui autorização para divulgar o nome da empresa MRS Logística S.A. bem como dados não confidenciais na elaboração de seu trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Juiz de Fora, 15 de Outubro de 2018.

---

Michel Philippe da Trindade e Silva