

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

**ROMULO ELOI PEREIRA TORRES**

**ANÁLISE DE QUEBRAS PREMATURAS DE SELOS MECÂNICOS APLICADOS  
EM BOMBAS CENTRIFUGAS EM FABRICAS DE CELULOSE**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA  
2019**

**ROMULO ELOI PEREIRA TORRES**

**ANÁLISE DE QUEBRAS PREMATURAS DE SELOS MECÂNICOS APLICADOS  
EM BOMBAS CENTRIFUGAS EM FABRICAS DE CELULOSE**

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Wanderson Stael Paris, MSc.

**CURITIBA  
2019**



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE DE QUEBRAS PREMATURAS DE SELOS MECÂNICOS APLICADOS EM BOMBAS CENTRIFUGAS EM FÁBRICAS DE CELULOSE**

por

**ROMULO ELOI PEREIRA TORRES**

Esta monografia foi apresentada em 04 de outubro de 2019 , como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Romulo Eloi Pereira Torres foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Wanderson Stael Paris  
Professor Orientador - UTFPR

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr.Eng.  
Membro Titular da Banca - UTFPR

---

Prof. Marcelo Rodrigues, Dr.  
Membro Titular da Banca - UTFPR

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos e colegas de trabalhos, que de alguma forma me incentivaram e me apoiaram nessa conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a DEUS por estar comigo nas minhas longas viagens que se fizeram necessária ao longo do curso de especialização.

Aos companheiros de classe, que souberam de forma construtiva discutir os temas abordados em sala, com opiniões e ponto de vista diversos, que possibilitaram uma visão sistêmica dos fatos.

Também não é possível de deixar de agradecer a minha família, amigos e colegas de trabalho, em especial a minha esposa pela paciência nos finais de semana de aula.

Agradeço ao meu orientador, pelo pronto atendimento, entusiasmo e sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Agradeço também aos profissionais da Compass, pelo direcionamento e trocas de experiências durante o curso e também a instituição UTFPR.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

TORRES, Romulo Eloi Pereira . **Análise de quebras prematuras de selos mecânicos aplicados em bombas centrífugas em fábricas de celulose**. 2019. 23. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Com o objetivo de demonstrar a importância do estudo de confiabilidade para a redução do número de quebras prematuras de selos mecânicos instalados em bombas centrífugas, foram analisados os dados de vida de uma população de 770 componentes (selos mecânicos) aplicados em uma unidade fabril de produção de celulose instalada no Sul do país. De posse dessas informações realizou-se uma análise dos dados de vida dessa população, como resultado, foram determinadas as distribuições de probabilidade com melhor aderência aos dados observados. Conhecendo tais distribuições, foi possível estimar as funções de confiabilidade  $R(t)$ , a função de risco  $h(t)$  e o MTTF. Ao final do estudo foi possível entender de que maneira a falha do selo ocorre, quais os mecanismos de falha existentes, qual a relação das falhas com as aplicações e assim propor análises mais aprofundadas, análise RAM, aos casos mais críticos e com maior potência de retorno financeiro para empresa.

**Palavras-chave:** Selos Mecânicos. Confiabilidade. Falhas prematuras. MTTF. RAM.

## ABSTRACT

TORRES, Romulo Eloi Pereira. **Analysis of premature breaks of mechanical seals applied to centrifugal pumps in pulp mills.** 2019. 23. Monography (Specialization in Reliability Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019

In order to demonstrate the importance of the reliability study to reduce the number of premature breaks of mechanical seals installed in centrifugal pumps, the life data of a population of 770 components (mechanical seals) applied in a manufacturing plant of pulp installed in the south of the country. Based on this information, we analyzed the life data of this population, as a result, we determined the probability distributions with better adherence to the observed data. Knowing these distributions, it was possible to estimate the reliability functions  $R(t)$ , the risk function  $h(t)$  and the MTTF. At the end of the study it was possible to understand how the failure of the seal occurs, what the existing failure mechanisms, what the relationship of the failures with the applications and thus to propose more in depth analyzes, RAM analysis, to the most critical cases and with more power of financial return to the company.

Keywords: Mechanical seals. Reliability. Premature failure. MTTF. RAM.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Principais países importadores de celulose do Brasil. ....	17
Figura 1.2 - Mapa com os estados produtores de celulose.....	18
Figura 1.3 - Localização da fábrica de celulose, objeto desse estudo. ....	18
Figura 1.4 - Principais falhas em bombas centrífugas em refinarias de petróleo .....	19
Figura 2.1 - Fluxograma de uma fábrica de celulose típica.....	22
Figura 2.2 - Exemplo de montagem de uma bomba centrífuga.....	23
Figura 2.3 - Arranjo de montagem de uma bomba centrífuga e seus componentes .	24
Figura 2.4 - Fluxo de líquido numa bomba centrífuga. ....	26
Figura 2.5 - Exemplos de configuração horizontal(esquerda) e vertical(direita).....	26
Figura 2.6 - Arranjo de montagem de um selos mecânico montado em uma bomba	27
Figura 2.7 - Configuração típica de projeto de selos mecânicos .....	28
Figura 2.8 - Ilustração de funcionamento de uma lubrificação fluída. ....	29
Figura 2.9 - Ilustração de funcionamento de uma lubrificação mista.....	29
Figura 2.10 - Variação de temperatura na interface .....	30
Figura 2.11 - Margem de temperatura na interface. ....	32
Figura 3.1 - Curva da função densidade de probabilidade (pdf). ....	39
Figura 3.2 - Exemplo de curva da banheira. ....	41
Figura 3.3 - Componente i ilustrado em forma de bloco.....	42
Figura 3.4 - Diagrama de blocos de um sistema em série .....	43
Figura 3.5 - Diagrama de blocos de arranjos em paralelo (a) puro .....	44
Figura 4.1 - Fluxograma com os principais equipamentos que compõem o sistema de água de selagem da planta. ....	46
Figura 4.2 - Distribuição de quebras de selos por ano. ....	47
Figura 4.3 - Distribuição do número de ocorrências por áreas produtivas. ....	48
Figura 4.4 - Dados de vida dos selos de toda fábrica. ....	49
Figura 4.5 - Tela do teste de aderência do Weibull ++ .....	50
Figura 4.6 - Histograma do tempo de operação até a quebra do selo. ....	50
Figura 4.7 - Parâmetros de confiabilidade, calculados pelo software Reliasoft.....	51
Figura 4.8 - Curva PDF dos dados de quebras de selos da planta. ....	51
Figura 4.9 - Função de confiabilidade R(t) e a função acumulada de falha F(t) versos tempo. ....	52
Figura 4.10 - MTTF calculado pelo QCP do Weibull ++. ....	52
Figura 4.11 -Dados de vida inseridos no Weibull ++ para a posição P3144. ....	53
Figura 4.12 - Linha do tempo e Histograma dos dados da P3144. ....	54
Figura 4.13 - Teste de aderência aos dados da P3144.....	54
Figura 4.14 - Gráficos da taxa de falha h(t) e pdf para parâmetro de forma $\beta = 0,884$ . .....	55
Figura 4.15 - Gráficos de Confiabilidade R(t) e Probabilidade Acumulada de Falha F(t).....	56

Figura 4.16 - Diagrama de bloco de uma bomba centrífuga P3144. ....	57
Figura 4.17 - Parâmetros ajustados na propriedade do bloco do BlockSim. ....	59
Figura 4.18 - Ajustes do simulador da manutenibilidade / disponibilidade. ....	59
Figura 4.19 - Relatório da simulação gerado pelo BlockSim para a P3144. ....	60
Figura 4.20 - Dados de vida inseridos no Weibull ++ para a posição P5114. ....	61
Figura 4.21 - Linha do tempo e Histograma dos dados da P5114.. ....	61
Figura 4.22 - Teste de aderência aos dados da P5114.....	62
Figura 4.23 - Gráficos da taxa de falha $h(t)$ e pdf para parâmetro de forma $\beta = 1,72$ . .....	63
Figura 4.24 - Gráficos de Confiabilidade $R(t)$ e Probabilidade Acumulada de Falha $F(t)$ .....	63
Figura 4.25 - Diagrama de bloco de uma bomba centrífuga P5114. ....	64
Figura 4.26 - Parâmetros ajustados na propriedade do bloco do BlockSim. ....	66
Figura 4.27 - Ajustes do simulador da manutenibilidade / disponibilidade. ....	66
Figura 4.28 - Relatório da simulação gerado pelo BlockSim para a P5114. ....	67
Figura 4.29 - Dados de vida inseridos no Weibull ++ para a posição P2015. ....	68
Figura 4.30 - Linha do tempo e Histograma dos dados da P2015. ....	68
Figura 4.31 - Teste de aderência aos dados da P2015.....	69
Figura 4.32 - Gráficos da taxa de falha $h(t)$ e pdf para parâmetro de forma $\beta = 1,02$ .. .....	70
Figura 4.33 - Gráficos de Confiabilidade $R(t)$ e Probabilidade Acumulada de Falha $F(t)$ .....	70
Figura 4.34 - Diagrama de bloco de uma bomba centrífuga P2015. ....	71
Figura 4.35 - Parâmetros ajustados na propriedade do bloco do BlockSim. ....	73
Figura 4.36 - Ajustes do simulador da manutenibilidade / disponibilidade. ....	73
Figura 4.37 - Relatório da simulação gerado pelo BlockSim para a P2015. ....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Tabela com dados de frequência das quebras de selos mecânicos. ....	48
Tabela 4.2 - TOP 3 bombas com mais ocorrências de quebras de selos. ....	53
Tabela 4.3 - Parâmetros da distribuição dos dados de vida.....	55
Tabela 4.4 - Dados de confiabilidade ajustados nos blocos para a simulação da P3144.....	58
Tabela 4.5 - Parâmetros da distribuição dos dados de vida. ....	62
Tabela 4.6 - Dados de confiabilidade ajustados nos blocos para a simulação da P5114.....	65
Tabela 4.7 - Parâmetros da distribuição dos dados de vida.....	69
Tabela 4.8 - Dados de confiabilidade ajustados nos blocos para a simulação da P2015.....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### LISTA DE ABREVIATURAS

### LISTA DE SIGLAS

MDIC	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
CMMS	<i>Computerized Maintenance Management System</i> Sistema Computadorizado de Gerenciamento de Manutenção
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i> Tempo Médio de Falha
PDF	<i>Probability Density Function</i> Função Densidade de Probabilidade
SAP	<i>Systems, Applications and Products in Data Processing</i> Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados
BBA	Bomba Centrífuga
MTE	Motor Elétrico
ACP	Acoplamento

### LISTA DE ACRÔNIMOS

RAM	<i>Reliability, Availability and Maintainability</i>
-----	--

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\beta$  Beta - Parâmetro de forma distribuição Weibull
- $\eta$  Eta - Parâmetro de escala da distribuição Weibull
- $\gamma$  Gama – Parâmetro de posição ( ou vida livre de falha ) da distribuição Weibull.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA .....	14
1.2	OBJETIVOS .....	16
1.2.1	Objetivos Geral .....	16
1.2.2	Objetivos Específicos .....	16
1.3	JUSTIFICATIVA .....	17
1.4	PROCEDIMENTO METODOLÓGICOS .....	20
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>2</b>	<b>ANÁLISE DO SISTEMA E CONCEITUALIZAÇÃO</b> .....	<b>22</b>
2.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA .....	22
2.2	DEFINIÇÃO DE BOMBA CENTRÍFUGA .....	23
2.2.1	Conceitos Preliminares .....	23
2.2.2	Vantagens e Desvantagens. ....	24
2.2.3	Campo de Aplicação. ....	25
2.2.4	Funcionamento .....	25
2.3	DEFINIÇÃO DE SELOS MECÂNICOS .....	27
2.3.1	Conceitos Preliminares .....	27
2.3.2	Funcionamento do Selo Mecânico .....	28
2.3.3	Sistema de Selagem .....	32
2.3.4	Analisando Falhas de Selos Mecânicos .....	33
2.3.5	Mecanismos e Causas de Falhas de Selos .....	34
2.4	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	35
<b>3</b>	<b>ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE</b> .....	<b>36</b>
3.1	CONCEITOS DE CONFIABILIDADE .....	36
3.2	EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA CONFIABILIDADE .....	37
3.3	GESTÃO DA CONFIABILIDADE .....	37
3.4	MEDIDAS DE CONFIABILIDADE .....	38
3.4.1	Função Confiabilidade $R(t)$ .....	39
3.4.2	Função de Risco $h(t)$ .....	40
3.4.3	Tempo Médio Até Falha, MTTF .....	41
3.5	ANÁLISE DE SISTEMAS SÉRIE-PARALELO .....	42
3.5.1	Introdução .....	42
3.5.2	Sistema em Série .....	42
3.5.3	Sistema em Paralelo .....	43
3.6	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	45
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>46</b>
4.1	ANÁLISE RAM DA POSIÇÃO P3144 .....	53
4.2	DIAGRAMA DE BLOCO P3144 .....	57

4.3	ANÁLISE RAM DA POSIÇÃO P5114.....	60
4.4	DIAGRAMA DE BLOCO P5114.....	64
4.5	ANÁLISE RAM DA POSIÇÃO P2015.....	68
4.6	DIAGRAMA DE BLOCO P2015.....	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em um mercado cada vez mais competitivo, as indústrias de celulose precisam cada vez mais manter seus ativos sempre disponíveis para os processos produtivos, a fim de garantir suas metas de produção, qualidade e custos. Diante desse cenário, o departamento de manutenção ganha grande destaque.

Segundo a ABNT (NBR 5462/1994), temos como conceito de manutenção como sendo.

Conjunto de ações técnicas e administrativas que tange como um todo o ramo e área industrial como um sistema único que destina manter ou recolocar um equipamento, instalação ou maquinário de um determinado setor, ou seja, sua principal função é manter em ordem o funcionamento dos equipamentos através de intervenções corretas e oportunas.

No entanto um conceito de função mais moderno de manutenção é definido segundo Pinto e Xavier if (2012) como sendo *“garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção, com confiabilidade, manutenibilidade, segurança, a preservação do meio ambiente e custo adequados”*.

Dessa forma, onde a manutenção da disponibilidade da função dos equipamentos ganha destaque, os selos mecânicos aplicados em bombas centrífugas são componentes de grande relevância, e para garantir sua confiabilidade projetada e conseqüentemente maior disponibilidade de máquinas, é de fundamental importância garantir que os mesmos estejam trabalhando dentro das condições exigidas por seus fabricantes.

Contudo, dentro de um processo industrial há diversos causadores de falhas prematuras em selos mecânicos. Com esse conceito, buscou-se reunir dados e informações com o propósito de evidenciar a relação das falhas prematuras dos selos mecânicos usados em bombas centrífugas e suas principais causas e modos de falhas.

### 1.1 PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA

Nesse processo de garantia de disponibilidade da função dos equipamentos, os selos mecânicos usados em bombas centrífugas são componentes de grande

relevância. Sua falha prematura, além de onerar os custos do departamento de manutenção, provocam paradas de máquinas e até mesmo de processos inteiros, gerando perdas de produção, aumentam o risco aos operadores das instalações e também podem causar impactos ambientais indesejáveis com vazamento de produtos químicos perigosos.

Dentre uma série de desafios teóricos e práticos para utilizar as ferramentas da confiabilidade como uma aliada nos processos de manutenção de uma instalação industrial, podemos citar algumas como principais:

Deve-se entender claramente como e de que maneira a falha dos selos ocorre, quais os mecanismos de falha existentes, qual a relação da falha com as condições de uso (temperatura, pressão, vibração, e outros).

A escolha e a correta análise dos dados de vida dos equipamentos que estão contidos nos sistemas de registros da manutenção, dados esses que serão a base para a escolha das distribuições de confiabilidade que melhor se ajustam com aos dados observados.

Recursos com softwares para cálculos estatísticos de confiabilidade, profissionais com especialização, e consultorias, devem fazer parte das previsões anuais de investimentos das empresas que desejam utilizar as ferramentas de confiabilidade em seu dia-a-dia. A alta direção da empresa devem estar envolvida para que um bom programa de confiabilidade tenha sucesso dentro do departamento de manutenção.

Com as premissas atendidas e as dificuldades superadas, é necessário responder as principais perguntas sobre as métricas da confiabilidade propostas pela pesquisa, por exemplo: Qual a probabilidade de um selo operar sem falhas, na condição de uso ao qual foi especificado em certo período de tempo? Quanto o departamento de manutenção irá onerar com esse tipo de componente? Qual o MTTF (Mean time to failure) esperado?

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivos Geral

O objetivo deste trabalho é demonstrar a importância do estudo de confiabilidade para a redução do número de quebras prematuras de selos mecânicos instalados em bombas centrífugas, com foco em posições que apresentam os menores MTTF( do inglês Mean time to Failure ).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

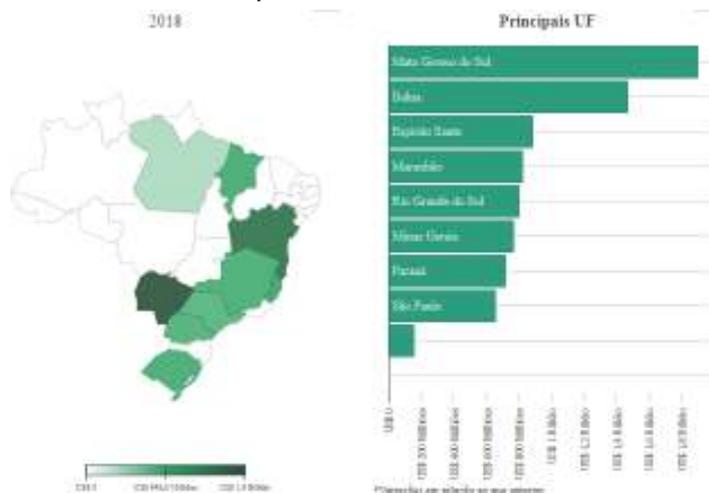
Para o cumprimento do objetivo geral deste trabalho as seguintes etapas foram executadas:

- Identificar as aplicações, os tipos, modelos e dados de vida de todos os selos mecânicos aplicados em bombas centrífugas da planta.
- Analisar as fichas de quebras dos locais de instalação onde ocorreram as falhas.
- Organizar os dados de vida dos selos mecânicos em um banco de dados afim de analisar esses dados em software de cálculo de confiabilidade.
- Determinar as distribuições de probabilidade que melhor se aderem aos dados observados.
- Conhecendo tais distribuições, estimar a probabilidade de sobrevivência de unidade para qualquer tempo, bem como outras medidas de confiabilidade tais como função de confiabilidade  $R(t)$ , a função de risco  $h(t)$  e o tempo médio até falha, MTTF.
- Realizar análise RAM (Reliability, Availability, Maintainability Analysis – Análise de Confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade ) das três posições maior número de ocorrências;
- Propor melhorias que irão proporcionar redução do número de quebras prematuras dos selos mecânicos, garantindo menor custo com a



Já na figura 1.2 , é possível verificar os estados do país que mais exportam suas produções, no topo da lista está o estado do Mato Grosso do Sul, seguido da Bahia e Espírito Santo. O estado do Paraná se encontra na sétima posição.

Figura 1.2 - Mapa com os estados produtores de celulose.



Fonte: MDIC (2016).

A fábrica onde se realizou o estudo que é objeto desse trabalho está localizada na região do Campos Gerais do estado do Paraná, conforme pode ser observado na figura 1.3 . Com capacidade de produzir 1,5 milhão de toneladas de celulose ao ano, sendo 1,1 milhão de celulose de fibra curta e 400 mil toneladas de celulose de fibra longa, a unidade é responsável por 50% da capacidade de produção da empresa, que conta com 17 unidades de negócio espalhadas pelo país e uma na Argentina.

Figura 1.3 - Localização da fábrica de celulose, objeto desse estudo.

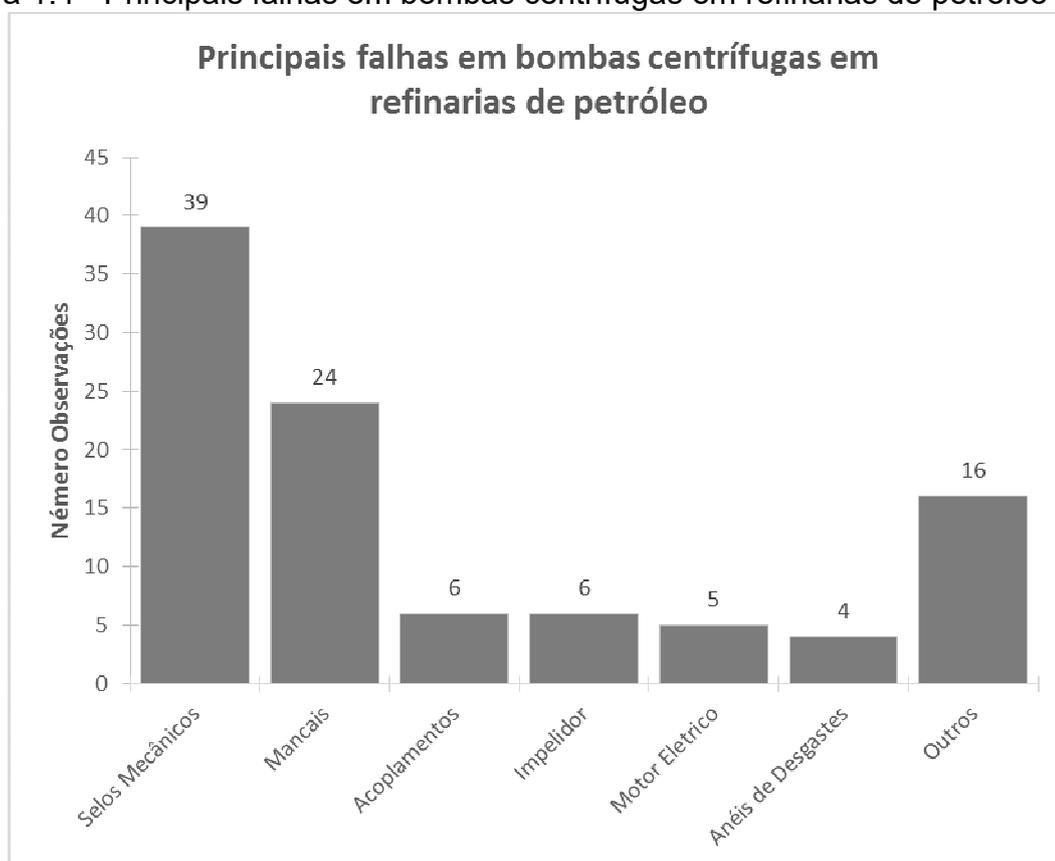


Fonte: Google Maps (2016).

Portanto, com números expressivos do ponto de vista de produção, a disponibilidade dos equipamentos responsáveis pelo funcionamento das plantas produtivas torna-se um fator preponderante para o sucesso do negócio.

Nesse processo de garantia de disponibilidade da função dos equipamentos, os selos mecânicos usados em bombas centrífugas são componentes de grande relevância. Logo abaixo na Figura 1.4 é possível verificar dados da industrial de petróleo, ao qual nos norteia sobre as principais falhas ocorridas em bombas centrífugas.

Figura 1.4 - Principais falhas em bombas centrífugas em refinarias de petróleo



Fonte: Nascif (2013).

Como podemos observar, cerca de 39% das falhas ocorrem com os selos, e nesse caso a sua falha prematura, além de onerar os custos do departamento de manutenção, provocam paradas de máquinas e até mesmo de processos inteiros, gerando perdas de produção, aumentam o risco aos operadores das instalações e também podem causar impactos ambientais indesejáveis com vazamento de produtos químicos perigosos.

Portanto, torna-se fundamental o estudo e investigação das causas das quebras de selos mecânicos, para evitar a recorrência de nova falhas.

Como uma forma de redução da indisponibilidade causada por quebras, será apresentado neste trabalho a aplicação de ferramentas da confiabilidade.

Inicialmente percebeu-se a necessidade de se realizar uma análise global da performance operacional do parque fabril estudado. Foi realizada uma análise de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade conhecida como análise RAM – Reliability, availability and maintainability. Identificou-se os ativos mais impactantes nestes três quesitos.

De acordo com Kardec (2002) manutenibilidade pode ser definida como a expectativa do equipamento ou sistema ser colocado em condições de operação dentro de um período de tempo estabelecido, quando a ação da manutenção é executada de acordo com procedimentos prescritos.

Como delimitação do estudo será focado em três ativos de uma lista gerada como forma de apresentação da metodologia da confiabilidade aplicada a equipamentos neste parque fabril. Será mostrado como foram aplicadas as ferramentas e que resultados práticos foram atingidos neste estudo em termos de disponibilidade e confiabilidade.

#### 1.4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICOS

Como o propósito de descrever as relações entre as quebras prematuras de selos aplicados em bombas centrifugas e o seus modos de falhas, apresentando uma abordagem quantitativa, reunindo e analisando dados históricos dos equipamentos estudados.

Já as técnicas adotadas para a pesquisa, foram bibliográficas e documentais . Para a pesquisa bibliográficas foram consultadas literaturas e manuais, acerca de assuntos tais como selos mecânicos, sistema de água selagem, manutenção industrial, bombas centrifugas, ferramentas da confiabilidade.

Para a pesquisa documental, foram estudados o cenário atual de um fábrica de celulose, com produção anual de 1500t de celulose, localizada na região dos Campos Gerais do estado do Paraná. Nessa ocasião, foram verificados documentos de projetos tais como, desenhos, malhas de controle de processos e fluxogramas.

Foram consultadas também fichas de quebras, registros contido em software de gestão da manutenção(CMMS), relatórios emitidos por empresas especializadas em reparo de selos e também consultas a profissionais da área.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa monografia é dividida em cinco capítulos, O capítulo 1 inicia-se com a introdução do tema, seu objetivo geral e na sequência em seus objetivos específicos, mostrando o problema e suas premissas, a justificativa, e uma breve apresentação da metodologia.

O capítulo 2 apresentará detalhes do objeto de pesquisa, como uma conceituação de bombas centrífugas, selos mecânicos, sistema de selagem, assim como uma rápida explanação sobre o processo de produção de celulose.

O capítulo 3 explica a metodologia aplicada, com conceitos de confiabilidade, análise de dados de vida, distribuições estatísticas e sistemas reparáveis.

O capítulo 4, o grande capítulo, demonstra a aplicação da metodologia exposta no capítulo 3 para o sistema estudado, relaciona os dados de falha e reparo dos componentes e os sistema onde são aplicados, e detalha as distribuições estatísticas de confiabilidade e manutenibilidade encontradas para cada um com auxílio do software Weibull ++.

O capítulo 5 apresentará a conclusão e síntese dos resultados obtidos das simulações dinâmica dos diagramas de blocos no software BlockSim para os cenários estabelecidos no capítulo 4. As dificuldades encontradas, e os benefícios para a empresa.

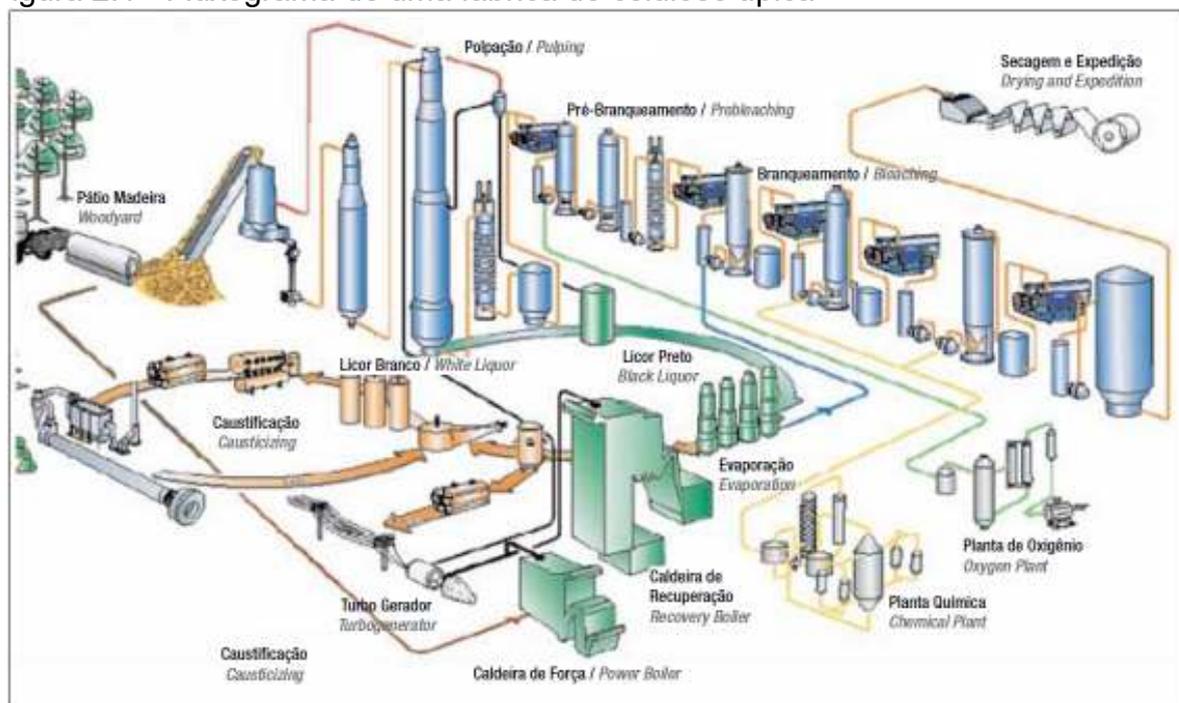
## 2 ANÁLISE DO SISTEMA E CONCEITUALIZAÇÃO

### 2.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O cenário em é de uma fábrica de celulose, com produção anual de 1500t de celulose, localizada na região dos campos gerais do estado do Paraná. Equipada com equipamentos diversos, no qual 750 posições estão sendo aplicados selos mecânicos.

Na figura 2.1 está sendo apresentado um fluxograma de um processo de produção de celulose e suas principais área de aplicação, áreas essas que possuem bombas centrífugas equipadas com selos mecânicos.

Figura 2.1 - Fluxograma de uma fábrica de celulose típica



Fonte: O Papel (2009).

## 2.2 DEFINIÇÃO DE BOMBA CENTRÍFUGA

### 2.2.1 Conceitos Preliminares

As bombas centrífugas são máquinas que fornecem energia ao líquido por meio da ação da força centrífuga afim de promover o seu escoamento.

As bombas centrífugas transformam o trabalho mecânico proveniente de fontes externas em energias cinéticas e de pressão, que são cedidas ao líquido. Na Figura 2.2 é possível visualizar um exemplo de montagem de uma bomba centrífuga acionada por um motor elétrico.

Figura 2.2 - Exemplo de montagem de uma bomba centrífuga.



Fonte: O autor (2019).

Seu emprego vem aumentando dia-a-dia devido a sua flexibilidade operacional, baixo custo de manutenção e os mais altos progressos técnicos alcançados na sua fabricação.

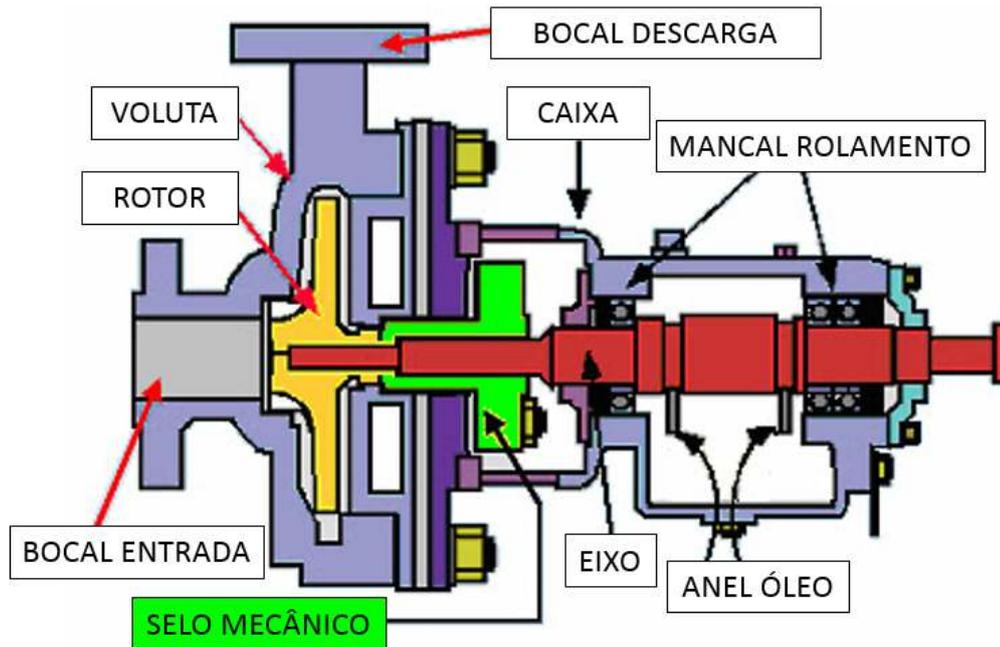
A disponibilidade de energia elétrica como fator econômico e o desenvolvimento das turbinas a vapor provocaram um estudo mais acurado nas teorias hidráulicas das bombas centrífugas visando o seu aprimoramento técnico-industrial.

E isso é notório, pois as bombas centrífugas são mais adequadas para trabalhar com grandes vazões e pressões moderadas, entretanto atualmente já se

consegue fabricar bombas centrífugas capazes de desenvolver mais de 150 bar na pressão de descarga.

Abaixo, figura 2.3, apresenta os principais componentes de uma bomba centrífuga, muito utilizada em processos de fabricação de celulose.

Figura 2.3 - Arranjo de montagem de uma bomba centrífuga e seus componentes



Fonte :LIMA, 2001

### 2.2.2 Vantagens e Desvantagens.

Abaixo estão apresentados algumas vantagens das bombas centrífugas:

- Vazão uniforme;
- Ocupam espaço reduzido;
- Baixo custo de manutenção;
- Ausência de válvulas;
- Apresentam menores vibrações;
- Requerem fundações mais simples;
- Trabalham com líquidos contendo lama, lodo ou outras impurezas;
- Menos sobressalente; etc.

Por outro lado, elas têm contra si;

- Aspiração difícil;
- Necessidade de escorva antes de começar a operar;
- Menor rendimento;
- Desaconselháveis para pequenas vazões e altas pressões; etc.

Escorvar uma bomba consiste em enchê-la de líquido juntamente com a tubulação de sucção a fim de expulsar todo ar ou todo gás existente no seu interior.

### 2.2.3 Campo de Aplicação.

O campo de aplicação das bombas centrífugas é vastíssimo. São empregadas frequentemente em:

- serviços de abastecimento d'água;
- estação de tratamento;
- serviço de esgoto;
- sistema de drenagem;
- centrais termoelétricas;
- centrais de refrigeração;
- indústria petrolífera;
- indústria química e petroquímicas;
- indústria de Celulose e Papel;
- sistema de combate a incêndios;
- uso marítimo;
- uso domiciliar; etc.

### 2.2.4 Funcionamento

O líquido é encaminhado para a parte central do rotor, entra em movimento de rotação e é impelido para a periferia do rotor pela ação da força centrífuga, adquirido grande velocidade (Figura 2.4); a seguir, percorre o contorno da carcaça

onde parte dessa energia de velocidade é transformada em energia de pressão e é lançado para fora da bomba pelo bocal de descarga.

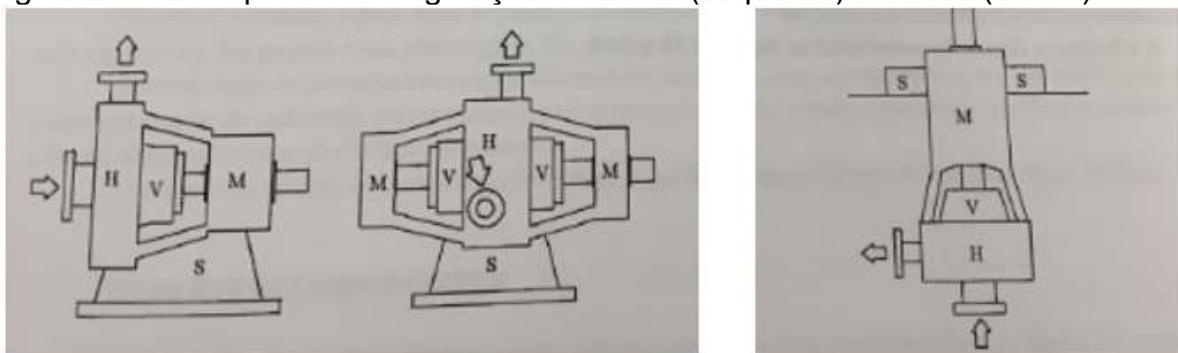
Figura 2.4 - Fluxo de líquido numa bomba centrífuga.



Fonte :LIMA, 2001.

As bombas centrífugas podem ser aplicadas nas posições horizontais e verticais, Figura 2.5, a depender das necessidades da instalação industrial onde está sendo aplicada.

Figura 2.5 - Exemplos de configuração horizontal(esquerda) e vertical(direita)



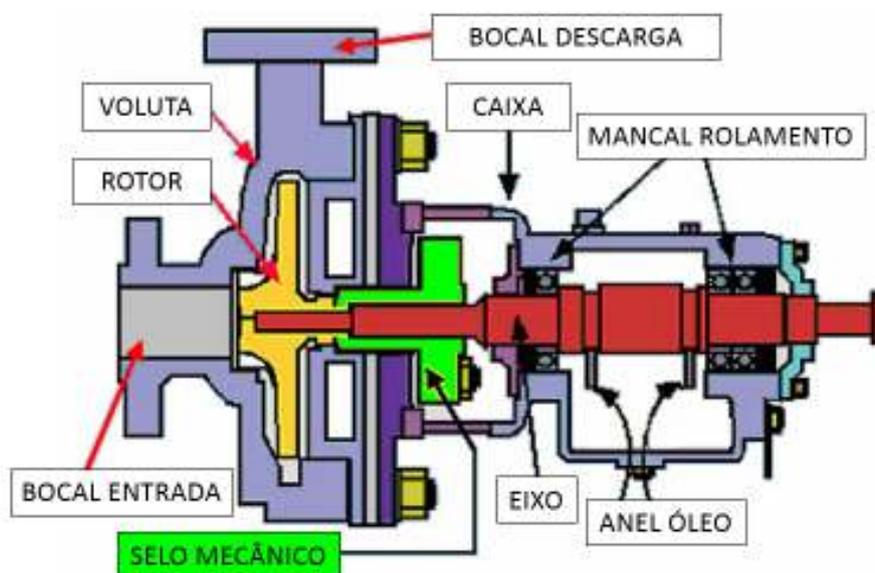
Fonte :LIMA, 2001.

## 2.3 DEFINIÇÃO DE SELOS MECÂNICOS

### 2.3.1 Conceitos Preliminares.

Os selos mecânicos são componentes quem visam impedir o vazamento descontrolado do fluido de trabalho de uma máquina rotativa pelas região de entrada do eixo da carcaça. A existência de fluidos químicos perigosos aplicados nos processos de produção de celulose leva à necessidade de termos uma vedação de alta confiabilidade nessas maquinas. Na Figura 2.6 abaixo é possível verificar a ilustração de uma bomba centrífuga e seus principais componentes, no destaque em verde é possível verificar a posição típica de instalação de um do selo mecânico.

Figura 2.6 - Arranjo de montagem de um selos mecânico montado em uma bomba



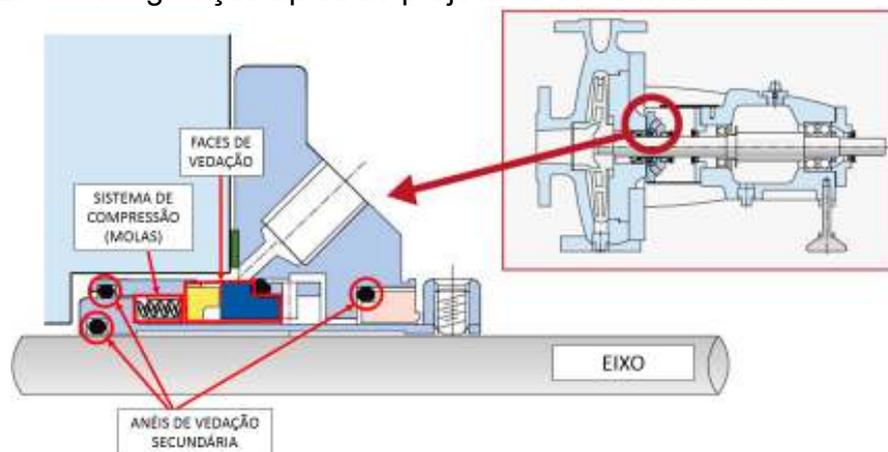
Fonte :LIMA, 2001

Segundo Affonso (2001), existem uma gama de projetos diversos de selos mecânicos, projetados sob medida para cada aplicação específica, contudo, independente dessas variações de projetos, todo selo mecânico tem, pelo menos, três componentes fundamentais:

- faces de vedação principal;
- veladores secundários;
- um mecanismo de compressão axial.

Na Figura 2.7 podemos verificar uma configuração típica de projeto de um selo mecânico simples aplicada em uma bomba centrífuga.

Figura 2.7 - Configuração típica de projeto de selos mecânicos



Fonte :LIMA, 2001

### 2.3.2 Funcionamento do Selo Mecânico

Em Lima (2001), é possível verificar que o mecanismo de funcionamento de um selo mecânico é uma complexa interação entre o atrito sólido e as forças hidrodinâmicas que se desenvolvem quando o selo está em funcionamento. O movimento relativo das faces gera movimento do fluido que está entre as faces.

O princípio de funcionamento dos selos mecânicos faz com que sempre haja algum vazamento do produto selado. Em condições normais, este vazamento será invisível a olho nu.

Se os anéis primários de um selo mecânico funcionarem sob condições de contato sólido total, ou seja, o vazamento é teoricamente nulo, mais somente por pouco tempo. O calor gerado pelo atrito de deslizamento é grande, danificando rapidamente as faces dos anéis primários e, como consequência, o vazamento excessivo de líquido logo aparece.

É difícil prever as condições reais de lubrificação existentes na interface. Podem ocorrer três tipos de lubrificação:

- Lubrificação Hidrostática;
- Lubrificação Hidrodinâmica;

- Lubrificação Mista.

Na lubrificação por filme fluido (uma combinação das lubrificações hidrostática e hidrodinâmica) a pressão exercida pela película é capaz de separar completamente as faces dos anéis primários. Nesta situação, consegue-se reduzir os desgastes das faces, mas com taxa de vazamentos maiores, vide Figura 2.8.

Figura 2.8 - Ilustração de funcionamento de uma lubrificação fluída.



Fonte :LIMA, 2001.

Contudo, Lima (2001) diz que na prática, a maioria dos selos mecânicos operam em um regime de lubrificação mista (figura 2.9) em que a carga na interface é suportada tanto pela película de líquido como pelo contato áspero das superfícies das faces.

Figura 2.9 - Ilustração de funcionamento de uma lubrificação mista.



Fonte :LIMA, 2001.

São requeridas espessuras de película da ordem 0,0003 a 0,001 mm a fim de manter o vazamento de líquido em níveis aceitáveis, cerca de 0,1 a 1,0 mililitro por

hora. Tais vazamentos são, muitas vezes, invisíveis porque pode ocorrer evaporação do líquido ao escapar para atmosfera.

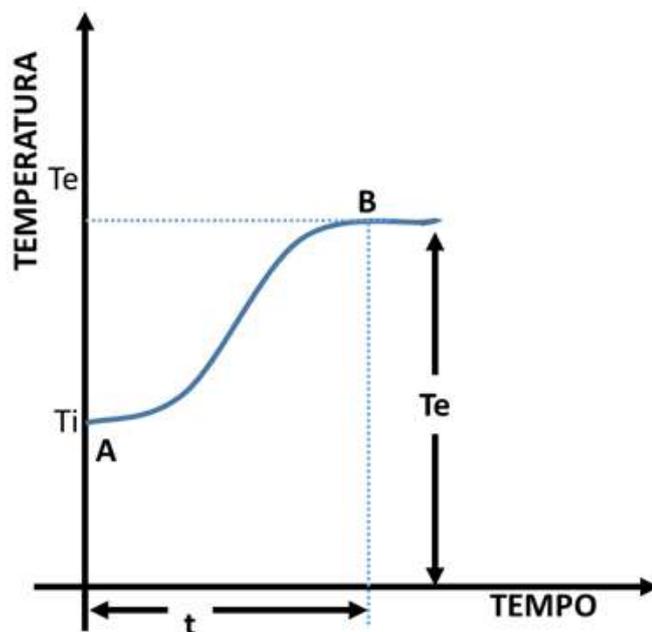
A temperatura do filme e a força de fechamento das faces são fatores primordiais para o bom desempenho do selo.

Na partida de uma bomba, a temperatura reinante na interface dos anéis primários do selo mecânico é igual a temperatura “Ti” do líquido na caixa de vedação e as faces desse anéis estão em contato direto.

Com o aumento da rotação, forma-se um filme de líquido na interface e a temperatura nessa região vai aumentando devido à geração de calor até atingir um patamar de equilíbrio “Te”. Esse patamar ocorre no momento em que a quantidade de calor gerada se iguala à quantidade de calor removida da interface.

A Figura 2.10 ilustra essa variação de temperatura.

Figura 2.10 - Variação de temperatura na interface



Fonte :LIMA, 2001.

A remoção do calor gerado na interface é realizada por condução, através dos anéis primários e pela circulação de líquido na caixa de vedação.

A quantidade de calor a ser removida deve ser tal que mantenha a temperatura de equilíbrio “Te”, do filme na interface bem inferior à temperatura de vaporização “Tv”, do líquido na pressão de selagem. Isto é:

$$Te < Tv$$

Se a temperatura de equilíbrio do líquido na caixa de vedação permanecer próxima temperatura de vaporização e se a dissipação do calor gerado na interface for insuficiente, pode ocorrer vaporizações cíclicas do filme de líquido naquela região. Isto é: o filme de líquido na interface não existirá.

Ao vaporizar-se, o líquido se expande, produzindo o efeito de uma pequena explosão e aproximando-as na região diametralmente oposta, podendo até ocorrer o contato metálico entre as fases. Logo em seguida, forma-se um novo filme com líquido frio que penetra entre as faces na região mais aberta provocando um resfriamento temporário.

Então, o selo volta a funcionar normalmente por um curto período de tempo até que a temperatura do filme aumente novamente a ponto de provocar outra vaporização, com repetição do ciclo das ocorrências já descritas.

Cada ciclo tem a duração de alguns segundos, a depender da severidade das condições operacionais.

Esse fenômeno é chamado de instabilidade da película ou instabilidade do filme na interface.

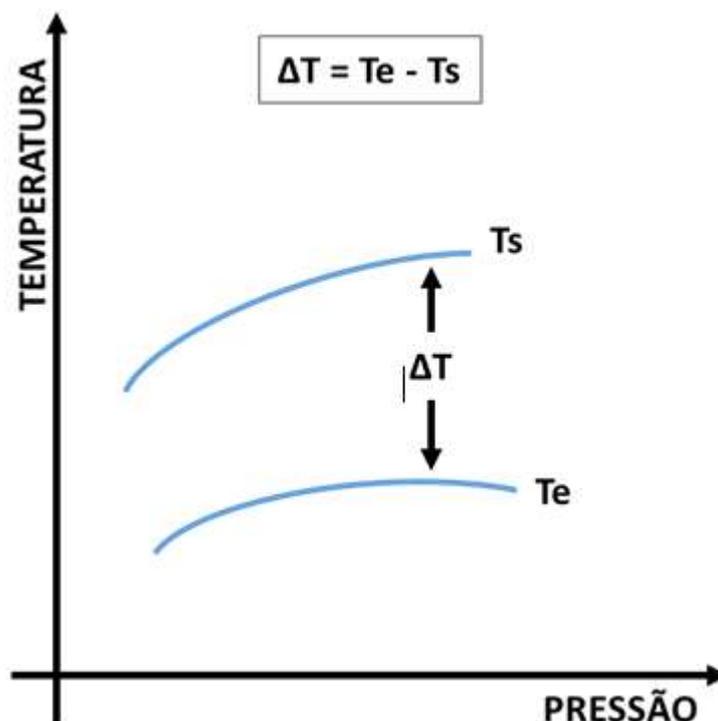
As vaporizações sucessivas e os contatos frequentes entre as faces seladoras provocam o funcionamento irregular do selo, acelerando o desgaste dessas peças.

O fenômeno da instabilidade da película pode ser identificado pela audição de estalos intermitentes na região do selo e por baforadas de vapor saindo da interface.

É de fundamental importância manter-se a temperatura do líquido na interface bem abaixo da temperatura de vaporização, na pressão de selagem.

A diferença entre a temperatura de vaporização “Tv”, e a temperatura de equilíbrio “Te”, é chamada de margem de temperatura  $\Delta T$  (Figura 2.11).

Figura 2.11 - Margem de temperatura na interface.



Fonte :LIMA, 2001.

### 2.3.3 Sistema de Selagem

Um selo mecânico vai oferecer seu melhor desempenho se estiver trabalhando num ambiente adequado, o que significa que a temperatura, viscosidade e pureza do fluido selado devem atender a certos requisitos. Nem sempre o produto bombeado pode ser qualificado de limpo e frio com viscosidade adequada, o que cria a necessidade de incluir sistemas de suporte para o selo. Deste modo, o controle do ambiente onde o selo trabalha, via seleção de um plano de selagem adequado, é um fator de extrema importância para a longevidade do componente.

No caso de ser utilizado fluido de selagem diferente do fluido bombeado, as seguintes características devem ser buscadas:

- a) Compatibilidade com o fluido bombeado, não causando reações indesejáveis, como formação de borra, vaporização etc.;

- b) Compatibilidade com os materiais de selo, evitando corrosão das partes metálicas e degradação dos elastômeros;
- c) A volatilidade e toxicidade devem ser tais que vazamentos para a atmosfera não representem riscos;
- d) A viscosidade deve ser sempre inferior a 500 cSt na menor temperatura de operação e maior que 1 cSt na maior temperatura.

Não existe um critério normativo para o teor de sólidos que caracteriza um produto “sujo”. Também não existe informação objetiva sobre o quanto podemos admitir de cristalização ou polimerização do produto selado. Um critério razoável é considerar “sujos” os fluidos que tenham mais de 100 ppm de indústria e exista uma enorme quantidade de selos operando satisfatoriamente com produtos mais sujos.

#### 2.3.4 Analisando Falhas de Selos Mecânicos

- a) Um selo mecânico em operação normal vai apresentar um pequeno e normalmente imperceptível vazamento. Uma falha de selo mecânico acontece quando esse vazamento normal (que só pode ser detectado com auxílio de instrumentos) atinge níveis intoleráveis.

O quanto o vazamento tem que crescer antes de ser considerado intolerável é uma questão que tem diversas respostas, dependendo do tipo de fluido (toxicidade e flamabilidade), do tipo de instalação, das normas ambientais vigentes do local, dos operadores de um turno específico, da nossa necessidade de manter a bomba em operação. Essa extremidade pode admitir um desgaste de alguns milímetros, se este for uniforme o suficiente para não causar vazamentos. O desgaste é causado pelo contato sólido inevitável na maior parte dos selos. Falhas por desgaste são controladas por mecanismos complexos, o que torna uma previsão da durabilidade do selo bastante difícil.

Considera-se que uma falha de um selo mecânico foi uma ocorrência anormal, isto é, ocorreu antes do fim da sua vida útil, toda vez que o mecanismo de falha por diferente do citado acima.

Além dos dados listados no Capítulo 2, os seguintes dados devem obtidos para uma análise adequada de falha:

- a) Projeto do selo, com desenho e materiais;

- b) Rotação e diâmetro do eixo e do selo;
- c) Pressão e temperatura reinantes na caixa de selagem;
- d) Fluxograma do sistema onde a bomba está instalada, incluindo sistemas de injeção para o selo;
- e) Características do fluido bombeado e do fluido de selagem, como viscosidade na temperatura de operação, teor e tipo de sólidos, pressão de vapor na temperatura de operação.

### 2.3.5 Mecanismos e Causas de Falhas de Selos

As causas mais comuns são:

- b) Manuseio inadequado das peças do selo – As faces de vedação são peças de precisão, muitas vezes fabricadas com materiais frágeis. Arranhões e lascamento devem ser evitados. Limpeza também muito importante.
- c) Montagem incorreta, tanto na posição das peças quanto na pré- carga do selo.
- d) Projeto inadequado pode propiciar desgaste por trabalhar com PV (pressão x velocidade periférica) muito alto, corrosão etc.
- e) Operação inadequada da bomba, como desregulagem da pressão da injeção, procedimento de partida incorreto etc.
- f) Contaminações do fluido selado podem erodir ou travar um selo.
- g) Más condições do equipamento onde o selo está instalado podem causar falhas, devido á vibração elevada, “run-out” axial ou radial elevado etc.

Os modos de falha de selos mecânicos podem ser englobados em três categorias:

- h) Ataque químico, como corrosão das partes metálicas, inchamento dos elastômeros.
- i) Dano mecânico, como desgaste das faces, cortes nos anéis -O, fraturas das faces etc.
- j) Dano térmico, como “heat-checking” da face, choque térmico, fragilização dos anéis -O.

## 2.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

As bombas centrífugas vem aumentando sua aplicação no dia-a-dia devido a sua flexibilidade operacional e baixo custo de manutenção, atualmente é amplamente recomendada e aplicada em processos de produção de celulose. Aliado a isso, os selos mecânicos, em seus diversos projetos e arranjos discutidos no decorrer desse capítulo tornam-se de vital importância para disponibilidade dos ativos (bombas centrífugas) estarem sempre cumprindo suas funções operacionais para os processos produtivos. No capítulo 3, será apresentado o referencial teórico da engenharia da confiabilidade e descreve as técnicas de análises de dados de vida (LDA), e arranjos de sistemas em serie e paralelo, para a determinação das métricas da confiabilidade.

### 3 ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

Nesse capítulo serão apresentados os principais conceitos de engenharia de confiabilidade para referenciar as análises que serão efetuadas no próximo, 4º capítulo.

#### 3.1 CONCEITOS DE CONFIABILIDADE

Segundo Fogliatto e Ribeiro, (2009) com o advento da economia globalizada, observou-se um aumento na demanda por produtos e sistemas de melhor desempenho a custos competitivos. Concomitantemente, surgiu a necessidade de redução na probabilidade de falhas em produtos (sejam elas falhas que simplesmente aumentam os custos associados aos produtos ou falhas que possam implicar riscos sérios à segurança ), o que resultou numa ênfase crescente em sua confiabilidade. O conhecimento formal resultante da análise de falhas e da busca da minimização de sua ocorrência provê uma rica variedade de contextos nos quais surgem considerações acerca da confiabilidade.

Em seu sentido mais amplo, confiabilidade está associada à operação bem sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas. Em análises de engenharia, todavia, é necessária uma definição quantitativa de confiabilidade, em termos de probabilidade. Tal definição, proposta por Leemis (1995), é apresentada a seguir; nos parágrafos que se seguem, os termos em itálico na definição são explicados.

“A confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas.”

Já Blanchard e Fabrycky (1990) definem a confiabilidade como “uma característica inerente ao projeto, e pode ser definida como a probabilidade na qual um sistema ou produto irá operar de modo satisfatório em um dado intervalo de tempo, quando utilizado restrito às condições de operação específicas”.

Retornando ao que é dito por Fogliatto e Ribeiro, (2009) a confiabilidade é definida como uma probabilidade. Isso significa que todas as confiabilidades devem

apresentar valores entre 0 e 1 e que os axiomas clássicos da probabilidade podem ser aplicados em cálculos de confiabilidade.

### 3.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA CONFIABILIDADE

Uma breve descrição da evolução histórica da confiabilidade é apresentada por Knight (1991). O conceito de confiabilidade em sistemas técnicos vem sendo aplicado há pouco mais de 50 anos. O conceito adquiriu um significado tecnológico após o término da Primeira Guerra Mundial, quando foi utilizado para descrever estudos comparativos feitos em aviões com um, dois ou quatro motores. Naquele contexto, a confiabilidade era medida como o número de acidentes por hora de voo.

Ainda segundo Knight (1991) , no final dos anos 50 e início dos anos 60, o interesse dos norte-americanos esteve centrado no desenvolvimento de mísseis intercontinentais e na pesquisa espacial, eventos motivados pela Guerra Fria. A corrida para ser a primeira nação a enviar uma missão tripulada à Lua, em particular, motivou avanços na área da confiabilidade, tendo em vista os riscos humanos envolvidos. Em 1963, surgiu, nos Estados Unidos, a primeira associação que reunia engenheiros de confiabilidade e o primeiro periódico para divulgação de trabalhos na área, o IEEE – Transactions on Reliability. Ao longo da década de 1960, diversos livros-texto sobre confiabilidade foram publicados.

E na década de 1970, o estudo da confiabilidade esteve centrado na análise dos riscos associados à construção e operação de usinas nucleares. A partir daí aplicações da confiabilidade nas mais diversas áreas se consolidaram.

### 3.3 GESTÃO DA CONFIABILIDADE

Segundo Fogliatto e Ribeiro, (2009) , um programa integrado de confiabilidade compreende o estabelecimento de práticas e procedimentos para gerir a confiabilidade nas seguintes fases da vida de um produto: (i) projeto e desenvolvimento, (ii) manufatura e instalação, (iii) operação e manutenção e (iv) descarte, quando encerra a vida operacional do produto. Além disso o programa de confiabilidade define a estrutura organizacional, responsabilidades, procedimentos, processos e recursos utilizados na gestão da confiabilidade. Os elementos de um

programa de confiabilidade incluem uma tarefa ou conjunto de tarefas realizadas por um indivíduo ou equipe.

A implantação bem-sucedida de um programa de gestão da confiabilidade demanda um grupo dedicado exclusivamente para esse fim. Um grau adequado de conhecimento é demandado dos membros do grupo, devido ao caráter multidisciplinar do programa de gestão. Assim, além de dominar os princípios matemáticos básicos de confiabilidade, o grupo deve ter familiaridade, por exemplo, com princípios e técnicas de desenvolvimento de produtos, fatores humanos e análise de custos. Para monitorar o desempenho de confiabilidade do sistema, o grupo deve montar um sistema eficiente de coleta e análise de dados, que permita a construção de uma base histórica de dados de confiabilidade na empresa.

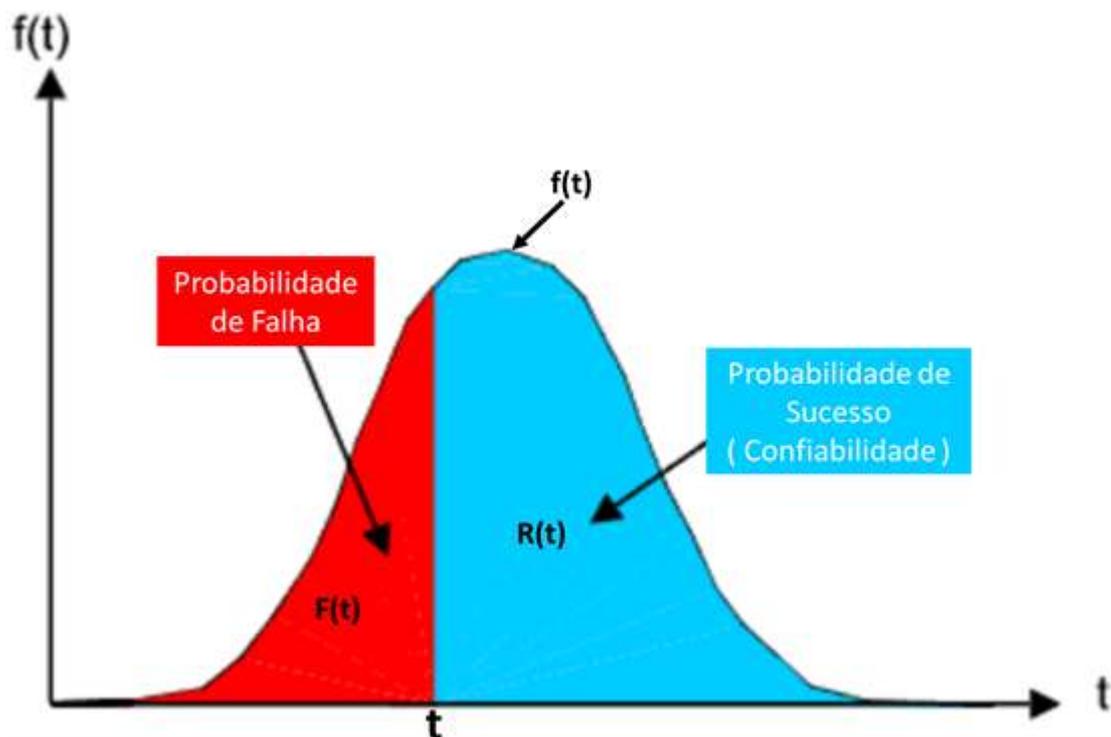
### 3.4 MEDIDAS DE CONFIABILIDADE

Nessa seção, seguindo Fogliatto e Ribeiro, (2009), apresentam-se diversas medidas de confiabilidade para uma unidade não-reparável (que não está sujeita a reparos). Unidade pode designar um componente, subsistema ou sistema. As três medidas de confiabilidade mais comumente usadas para unidades não-reparáveis apresentadas nesta seção são (i) a função de confiabilidade  $R(t)$ , (ii) a função de risco  $h(t)$  e (iii) o tempo médio até falha, MTTF (mean time to failure).

### 3.4.1 Função Confiabilidade R(t)

Em Mariano e Rigoni (2018), a função de confiabilidade R(t), é informada como sendo a probabilidade de a unidade apresentar sucesso na operação (isto é, ausência de falhas) no intervalo de tempo (0,t) e ainda estar funcionando no tempo t.

Figura 3.1 - Curva da função densidade de probabilidade (pdf).



Fonte :O autor, 2019.

Já a função de distribuição de T, F (t), é o complemento de R(t), na equação (3.1) , ou seja:

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (3.1)$$

A função de confiabilidade R(t) é também denominada função de sobrevivência.

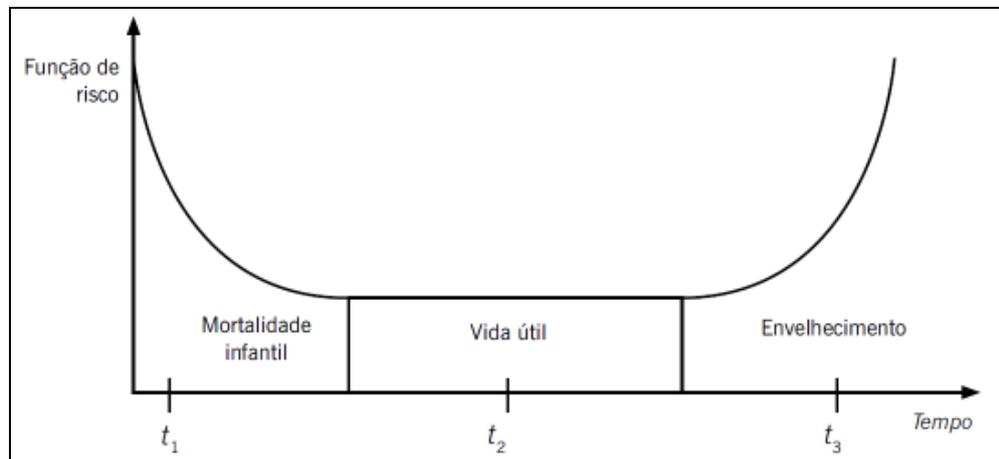
### 3.4.2 Função de Risco $h(t)$

Seguindo os conceitos apresentados em Fogliatto e Ribeiro, (2009), 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. A forma da função de risco é um indicativo da maneira como uma unidade envelhece. Existem três classificações básicas para a função de risco: (i) função de risco crescente, em que a incidência de risco cresce com o tempo; (ii) função de risco decrescente, em que a incidência de risco decresce com o tempo; e (iii) função de risco constante ou estacionária, em que a unidade está exposta a uma mesma quantidade de risco em qualquer momento do tempo.

A Figura 3.2 pode ser facilmente interpretada resgatando os conceitos apresentados anteriormente por Fogliatto e Ribeiro, (2009) e também por Mariano e Rigoni, (2018) . Onde as deficiências no processo de manufatura de um produto levam a falhas precoces, que se concentram no início de sua vida, na chamada fase de mortalidade infantil. As falhas que incidem na fase de vida útil do produto devem-se tipicamente a condições extremas no ambiente de operação do produto e podem ocorrer, uniformemente, em qualquer momento no tempo.

Finalmente, a deterioração do produto frequentemente leva a falhas por desgaste, concentradas no final da vida útil do produto, na fase de envelhecimento.

Figura 3.2 - Exemplo de curva da banheira.



Fonte : Fogliatto e Ribeiro, (2009).

Abaixo, de acordo com Mariano e Rigoni (2018) podemos verificar a equação (3.2) , da taxa de falha instantânea, que é a função de risco, dada por :

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.2)$$

A unidade de medida em uma função de risco é normalmente dada em termos de falhas por unidade de tempo.

### 3.4.3 Tempo Médio Até Falha, MTTF

O tempo médio até falha de uma unidade, designado por MTTF (do inglês mean time to failure), pode ser definido como:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.3)$$

Para a maioria das funções de distribuição que a variável T pode apresentar, a determinação do MTTF a partir da expressão na equação (3.3).

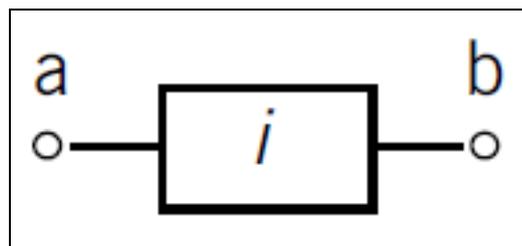
### 3.5 ANÁLISE DE SISTEMAS SÉRIE-PARALELO

#### 3.5.1 Introdução

De acordo com Fogliatto e Ribeiro, (2009), sistema é todo o conjunto de componentes interconectados segundo um projeto predeterminado, de forma a realizar um conjunto de funções de maneira confiável e com bom desempenho. Sistemas são aqui representados por arranjos de blocos funcionais. Os blocos funcionais, aqui designados por componentes, podem ser subsistemas ou componentes individuais, dependendo do tipo de sistema e das condições estabelecidas para o estudo. O tipo e a qualidade dos componentes usados, bem como a forma como estão arranjos influem diretamente no desempenho e na confiabilidade do sistema por eles composto. A forma mais difundida de representação estrutural de sistemas utiliza o diagrama de blocos de confiabilidade.

Considere a representação, através de um diagrama de blocos, de um sistema com  $n$  componentes. Nesse caso, cada componente será representado por um bloco, como na Figura 3.2.

Figura 3.3 - Componente  $i$  ilustrado em forma de bloco



Fonte : Fogliatto e Ribeiro, (2009).

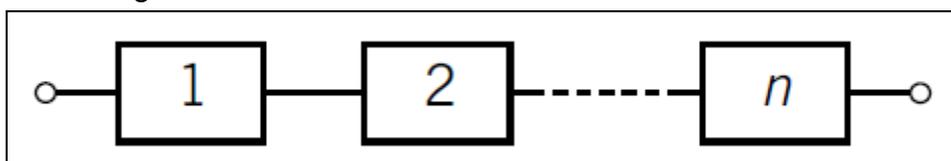
Tal diagrama oferece uma representação gráfica da forma como componentes do sistema estão conectados entre si.

#### 3.5.2 Sistema em Série

Mariano e Rigoni, (2018), definem que em um sistema em série,  $n$  componentes estão conectados de tal forma que a falha de qualquer componente

resulta na falha de todo o sistema. Os arranjos em série são muito utilizados no projeto de produtos industriais já que, por não apresentarem redundância de componentes, costumam apresentar menor custo. Para determinar a confiabilidade de um sistema em série, é necessário conhecer as confiabilidades de suas partes componentes no momento da análise. O diagrama de blocos de um sistema em série está apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Diagrama de blocos de um sistema em série



Fonte : Fogliatto e Ribeiro, (2009).

Ainda segundo Mariano e Rigoni, (2018) , em um sistema em série, todos os componentes devem estar operantes para que o sistema esteja operante. Assim, a confiabilidade do sistema pode ser expressa conforme equação (3.4) :

$$R_s = P(X_1) \times P(X_2) \times \dots \times P(X_n) = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3.4)$$

A Equação acima é conhecida como a regra do produto em confiabilidade. A aplicação prática da equação conduz a um cenário no qual a confiabilidade do sistema decresce rapidamente à medida que o número de componentes aumenta. O limite superior na confiabilidade do sistema é dado pelo componente menos confiável.

### 3.5.3 Sistema em Paralelo

Já em um sistema em paralelo, conforme dito por Mariano e Rigoni, (2018), todos os componentes devem falhar para que o sistema falhe. A confiabilidade de um sistema em paralelo de componentes independentes é determinada pela equação (3.5) a partir da sua não-confiabilidade, isto é:

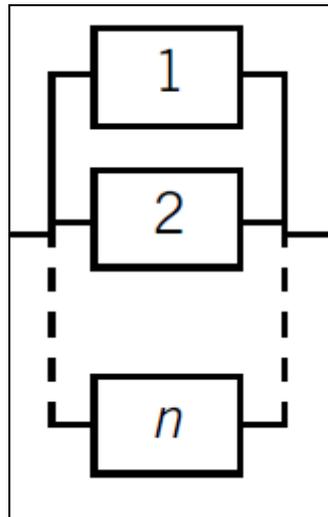
$$R_s = P(\bar{X}_1) \times P(\bar{X}_2) \times \dots \times P(\bar{X}_n) \quad (3.5)$$

Já a confiabilidade do sistema é dada pela probabilidade complementar, equação (3.6):

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (3.6)$$

A análise do sistema em paralelo apresentada anteriormente pressupõe que todos os componentes são ativados quando o sistema é ativado e que falhas não afetam a confiabilidade dos componentes sobreviventes. Tal arranjo é conhecido como arranjo paralelo puro, representado na Figura 3.5, constituindo uma parcela dos arranjos em paralelo existentes. Outros arranjos em paralelo, com carga compartilhada e com redundância em *stand by*, são mais utilizados na prática.

Figura 3.5 - Diagrama de blocos de arranjos em paralelo (a) puro



Fonte : Fogliatto e Ribeiro, (2009).

Em arranjos com carga compartilhada, a taxa de falha dos componentes sobreviventes aumenta à medida que falhas ocorrem. O sistema de turbinas de um avião é um bom exemplo desse arranjo. Se uma das turbinas deixar de operar, as turbinas remanescentes deverão sustentar uma carga de operação maior, o que acarretará em aumento na sua taxa de falha.

### 3.6 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

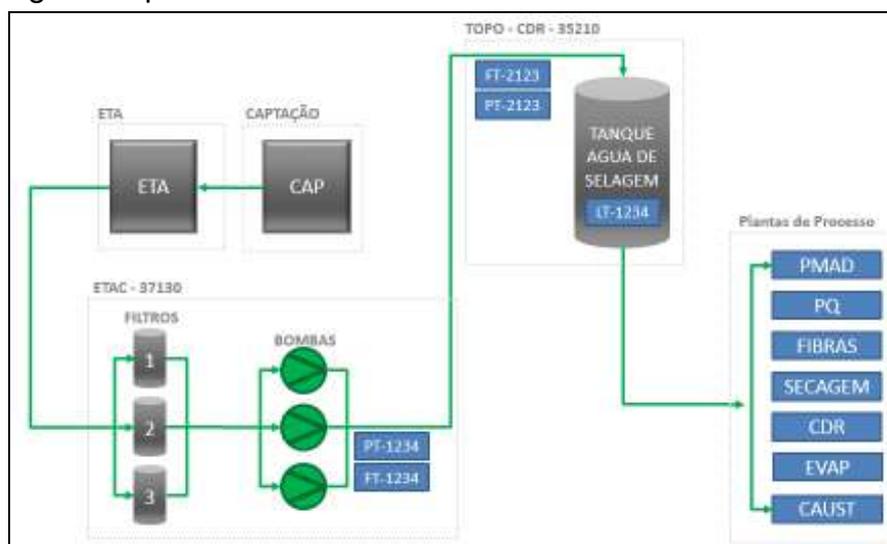
Nesse capítulo foi apresentado uma introdução sobre confiabilidade, um pouco sobre a evolução histórica da área e suas aplicações, bem como expor as principais medidas de confiabilidade aplicadas nesse trabalho.

Na sequência apresenta-se a representação de sistemas de componentes através de diagramas de blocos em serie e em paralelo, bem como combinações dos dois sistemas. Tal introdução tornam-se de vital importância para o entendimento e desenvolvimento do trabalho, que será apresentado no capítulo 4, com a apresentação de LDA dos selos aplicados em bombas centrifugas, de histogramas dos tempos até a falha, de gráficos de confiabilidade, probabilidade acumulada de falhas, etc. .

## 4 DESENVOLVIMENTO

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa exploratória para entender melhor o contexto, dessa forma, foram consultados documentos de projetos tais como, desenhos, malhas de controle de processos e fluxogramas, também foram realizadas visitas nas áreas de aplicações, bem como conversas com as equipes de manutenção especializada em tratar assuntos relacionados aos selos mecânicos, a partir daí, foram reunidas essas informações e começou a ser elaborado um croqui, Figura 4.1, com os principais equipamentos que compõem o sistema de distribuição de água de selagem, esse croqui ajudou a entender como os selos são lubrificados e arrefecidos, quais as principais áreas onde são aplicados, e posteriormente identificar as causas de algumas quebras também.

Figura 4.1 - Fluxograma com os principais equipamentos que compõem o sistema de água de selagem da planta.



Fonte :O autor, 2019.

Na sequência, foram verificados no software de gestão da manutenção, CMMS - *Computerized Maintenance Management System*, os registros dos dados de vida dos equipamentos que possuem selos mecânicos, as fichas de quebras, relatórios emitidos por empresas especializadas em reparo de selos e também consultas a profissionais da área. Como resultado dessa pesquisa criou-se um banco de dados com os tempos até falha de todas as posições instaladas da planta, de posse desses dados foram criadas algumas análises estatísticas. A primeira,

figura 4.2, foi a construção do gráfico com a distribuição de quebras de selos durante os anos de 2016, 2017 e 2018.

Figura 4.2 - Distribuição de quebras de selos por ano.

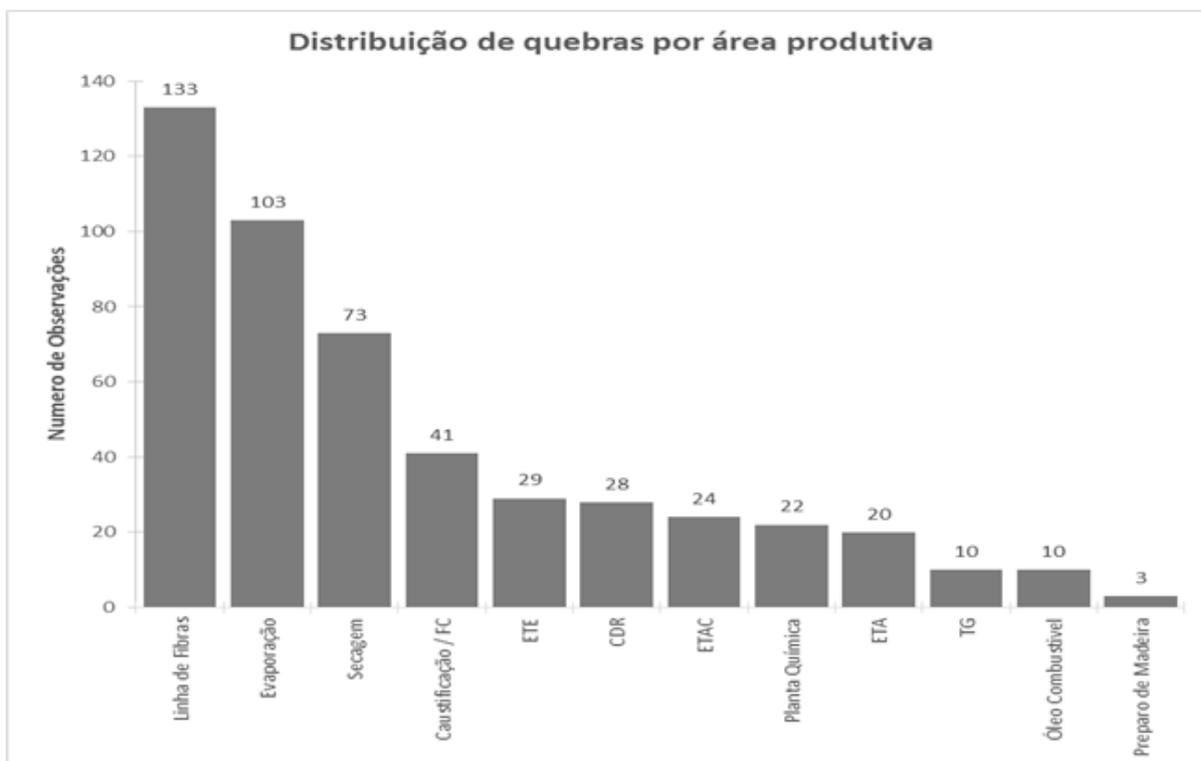


Fonte :O autor, 2019.

Como é possível observar, em 2016 ocorreram 148 falhas, uma média de aproximadamente 16 Selos/mês, lembrando que nesse ano foram considerados apenas 9 meses, visto que a plantas produtivas iniciaram suas operações em março desse mesmo ano. Já em 2017, houve um aumento de aproximadamente 24% no valor total de quebras, atingindo a marca de 184 quebras, contudo com uma média de 15 Selos/mês, menor em relação ao ano anterior. Em 2018 forma registradas um total de 164 quebras, uma redução de 11% no valor total e uma média de 13 Selos/mês, demonstrando uma dedução ao longo do tempo.

Conhecendo como o sistema foi concebido, foi elaborando uma distribuição do número de ocorrências de quebras nas diversas áreas produtivas, Figura 4.3 , como é possível de observar, a grande maioria, cerca de 62%, das quebras se concentraram em 03 das 12 áreas produtivas existentes na planta, que são elas, Linha de Fibras com 133 registros, Evaporação com 103 registros e Secagem com 73 registros.

Figura 4.3 - Distribuição do número de ocorrências por áreas produtivas.



Fonte :O autor, 2019.

Um outro dado importante constatado na pesquisa das quebras, foi a distribuição dos tempos de vida dos selos já instalados, abaixo está apresentada a Tabela 4.1, nela é possível identificar a distribuição de tempos até a falha de um total de 496 eventos de troca de selos durante os anos de 2016, 2017 e 2018.

Tabela 4.1 - Tabela com dados de frequência das quebras de selos mecânicos.

Classes	Classes	NºObservações
1	2 F 202	182
2	202 F 402	155
3	402 F 602	51
4	602 F 802	66
5	802 F 1002	42
<b>Total ( N ) =</b>		<b>496</b>

Fonte: O autor (2019).

Nota-se que ocorreram 182 registros, cerca de 37% dos casos de quebras em um tempo maior que 0 e menor que 202 dias, ou 6 meses de operação, ou seja, muitas quebras prematuras, confirmando muitas dos relatos observados durante a pesquisas de campo, principalmente os fornecidos pelas equipes de manutenção.

Diante disso, os dados de vida dos componentes foram inseridos no software Weibull ++, Figura 4.4, com o objetivo de verificar as distribuições de probabilidade e assim estimar algumas medidas de confiabilidade tais como a função de confiabilidade  $R(t)$ , função acumulada de falha  $F(t)$  e o MTTF.

Figura 4.4 - Dados de vida dos selos de toda fábrica.

Quantidade	Condição F ou S	Tempo Operação (dia)	IDs Subconjunto 1
1	F	428	OR30-31100P0030
1	F	722	OR30-31100P0032
1	F	842	OR30-31100P0033
1	F	741	OR30-32000P0055
1	F	233	OR30-32000P0070
1	F	334	OR30-32000P0070
1	F	232	OR30-32000P0071
1	F	449	OR30-32100P1022
1	F	64	OR30-32100P1022
1	F	474	OR30-32100P1022
1	F	981	OR30-32110P1126
1	F	371	OR30-32110P1212
1	F	478	OR30-32110P1212
1	F	83	OR30-32110P1212
1	F	371	OR30-32110P1212
1	F	478	OR30-32110P1212
1	F	83	OR30-32110P1212
1	F	798	OR30-32110P1214

Fonte: O autor (2019).

Realizando o teste de aderência do software Weibull ++, como resultado dos ranques de distribuição , a Weibull-3P apresentou melhor aderência aos dados, figura 4.5 , a mesma foi implementada.

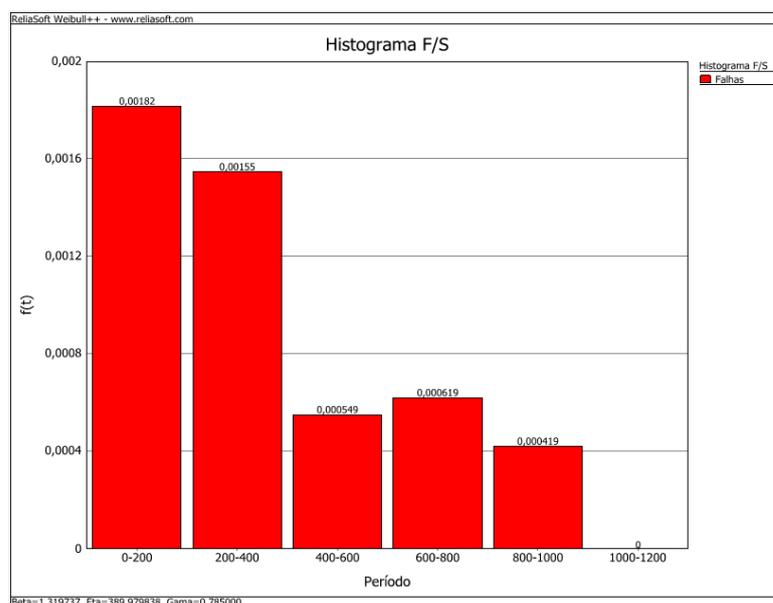
Figura 4.5 - Tela do teste de aderência do Weibull ++



Fonte: O autor (2019).

O primeiro gráfico elaborado pelo software Weibull++ foi o histograma, figura 4.6, nele é possível visualizar a distribuição dos dados ao longo do tempo de operação dos componentes.

Figura 4.6 - Histograma do tempo de operação até a quebra do selo.



Fonte: O autor (2019).

É possível observar a maior concentração nas duas primeiras colunas , principalmente a primeira , que é 0 à 200 dias, já os parâmetros de confiabilidade calculados para essa destruição de dados podem ser visualizados na figura 4.7.

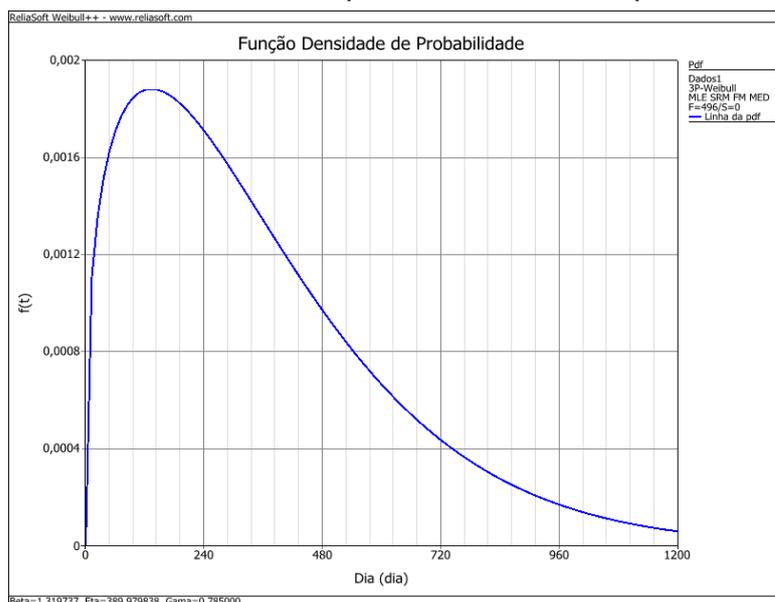
Figura 4.7 - Parâmetros de confiabilidade, calculados pelo software Reliasoft.



Fonte: O autor (2019).

Na figura 4.8, é apresentado o gráfico da função densidade de probabilidade da variável aleatória, tempo até falha.

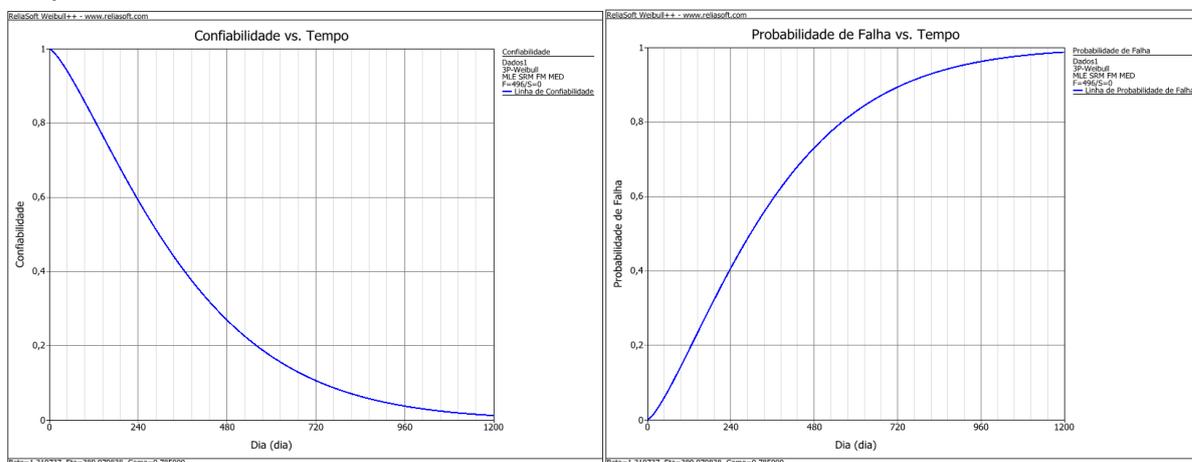
Figura 4.8 - Curva PDF dos dados de quebras de selos da planta.



Fonte: O autor (2019).

Na figura 4.9 , estão os gráficos da função de confiabilidade  $R(t)$  e a função acumulada de falha  $F(t)$ .

Figura 4.9 - Função de confiabilidade  $R(t)$  e a função acumulada de falha  $F(t)$  versos tempo.



Fonte: O autor (2019).

Com ajuda do recurso de QCP ( do inglês *Quick Calculation Pad* ) do software Weibull ++ foi estimado o MTTF, apresentando como resultado o valor de 359,89 dias, conforme figura 4.10.

Figura 4.10 - MTTF calculado pelo QCP do Weibull ++.



Fonte: O autor (2019).

Apesar do valor de MTTF estar com aproximadamente um ano , foi possível verificar no histograma um acúmulo de quebras no período menor que 200 dias , ou seja 6 meses, é isso é muito baixo , honerando os custos de manutenção, dessa forma , através de uma análise do banco de dados com as informações de quebras

de selos, foram escolhidos os 3 componentes (TOP 3) com maior número de ocorrências para que fossem estudados e avaliados separadamente.

Os componentes escolhidos podem ser visualizados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - TOP 3 bombas com mais ocorrências de quebras de selos.

ID	Área	NºObservações
P3144	Linha de Fibras	7
P5114	Linha de Fibras	10
P2015	Secagem	9

Fonte: O autor (2019).

Com a escolha dessas posições iniciou-se uma análise RAM, com o objetivo de avaliar a confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade e também os custos envolvidos.

#### 4.1 ANÁLISE RAM DA POSIÇÃO P3144

A análise RAM começa com o levantamento dos dados de tempo de vida da bomba centrífuga instalada na posição P3144, localizada na área produtiva da Linha de Fibras, área com maior número de ocorrências. O valor total de ocorrências com selos mecânicos registradas no sistema CMMS é igual 7 quebras, de posse dos tempos de operação de cada selo instalado nessa posição, os valores dos tempos até falhas foram inseridos no Weibull ++, conforme a figura 4.1.

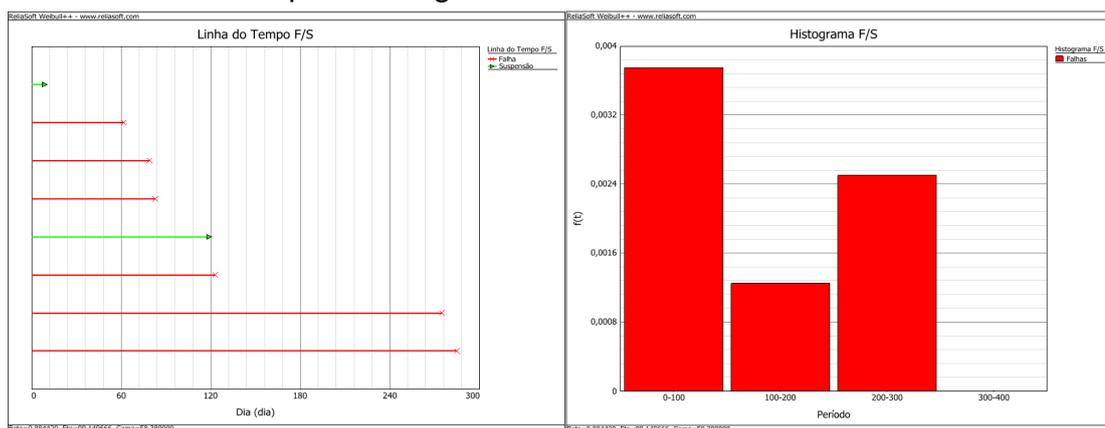
Figura 4.11 -Dados de vida inseridos no Weibull ++ para a posição P3144.

Quantidade	Condição F ou S	Tempo Operação (dia)	IDs Subconjunto 1
1	F	275	P3144
1	F	62	P3144
1	F	285	P3144
1	F	79	P3144
1	F	83	P3144
1	S	9	P3144
1	F	123	P3144
1	S	119	P3144

Fonte: O autor (2019).

A figura 4.12, apresentada abaixo é possível visualizar os gráficos de linha do tempo, e também o histograma da distribuição de probabilidade da variável aleatória tempo até a falha, uma maneira ilustrativa de visualizar os dados de falhas(6) e suspensões(2).

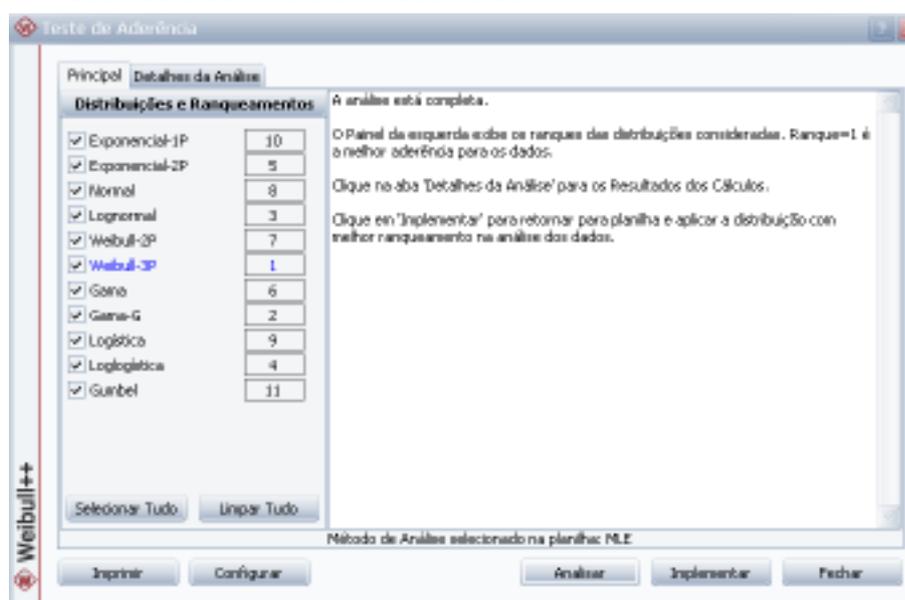
Figura 4.12 - Linha do tempo e Histograma dos dados da P3144.



Fonte: O autor (2019).

Realizada o teste de aderência do software, e como resultado dos ranques das distribuições, a Weibull-3P apresentou melhor aderência aos dados, figura 4.13, a mesma foi implementada.

Figura 4.13 - Teste de aderência aos dados da P3144.



Fonte: O autor (2019).

Com a implementação da distribuição Weibull-3P, os parâmetros de confiabilidade foram calculados e apresentados na tabela 4.3.

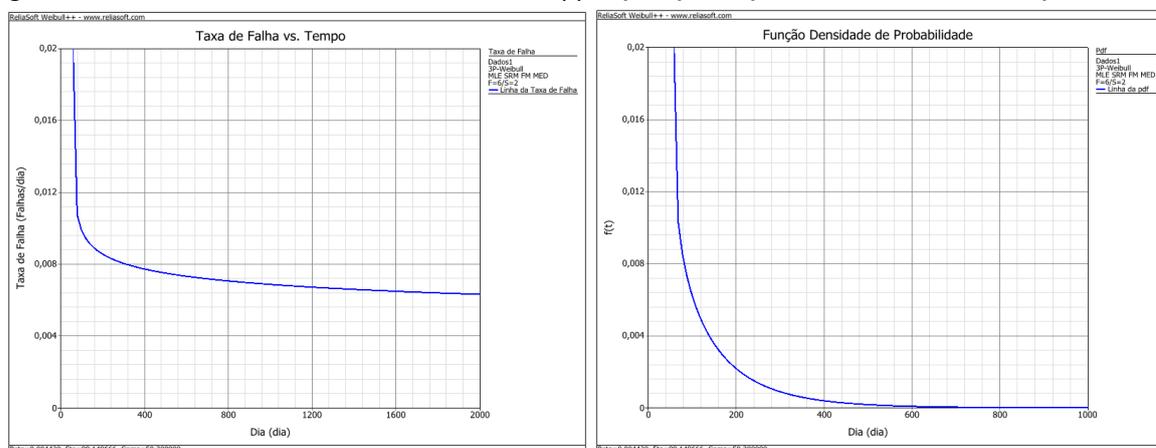
Tabela 4.3 - Parâmetros da distribuição dos dados de vida.

Parâmetro	Unidade	Valor
$\beta$ (Beta) =	-	0,884
$\eta$ (Eta) =	dia	99,14
$\Upsilon$ (Gama) =	dia	58,38
MTTF =	dia	163,72

Fonte: O autor (2019).

Com um  $\beta = 0,884$ , podemos observar através da figura 4.14 (gráfico esquerdo), os efeitos do parâmetro de forma sobre a taxa de falha  $h(t)$  de uma distribuição Weibull, indicando um maior risco no início de vida e posteriormente um decréscimo com o tempo, nesse caso podendo ser interpretado resgatando os conceitos da curva da banheira, em que os dados de quebras se concentram no início de sua vida, também conhecido por mortalidade infantil, onde suas principais causas estão associadas ao processo de manufatura, projetos inadequados, mau uso e ou manutenção inadequada. Também na figura 4.14 (gráfico direito) é possível verificar a curva pdf com as distribuições de probabilidade da variável tempo até falha.

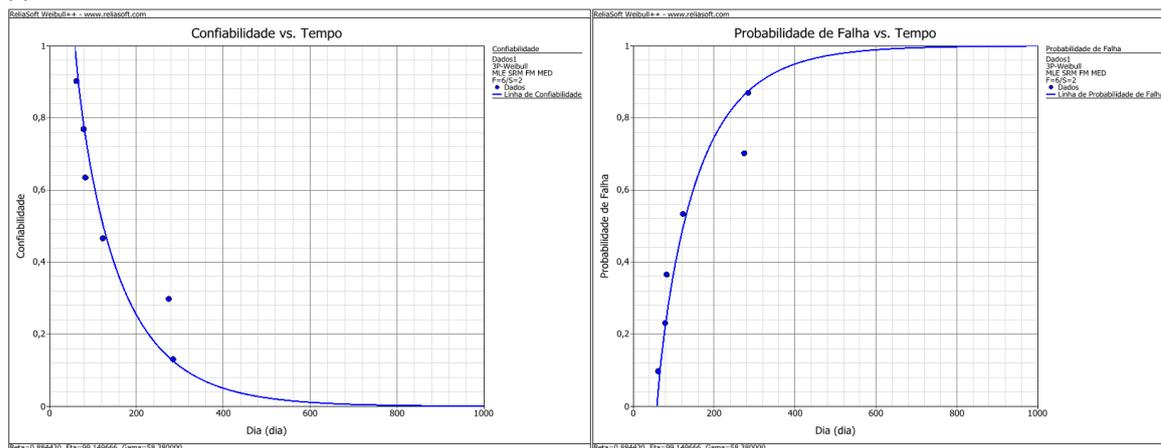
Figura 4.14 - Gráficos da taxa de falha  $h(t)$  e pdf para parâmetro de forma  $\beta = 0,884$ .



Fonte: O autor (2019).

A figura 4.15 (gráfico esquerdo) demonstram o comportamento da curva de confiabilidade  $R(t)$  e probabilidade acumulada de falha  $F(t)$  (gráfico direito) para a bomba P3144, com um MTTF de 163 dias, demonstrando uma baixa performance em relação a posições similares instaladas na planta.

Figura 4.15 - Gráficos de Confiabilidade  $R(t)$  e Probabilidade Acumulada de Falha  $F(t)$

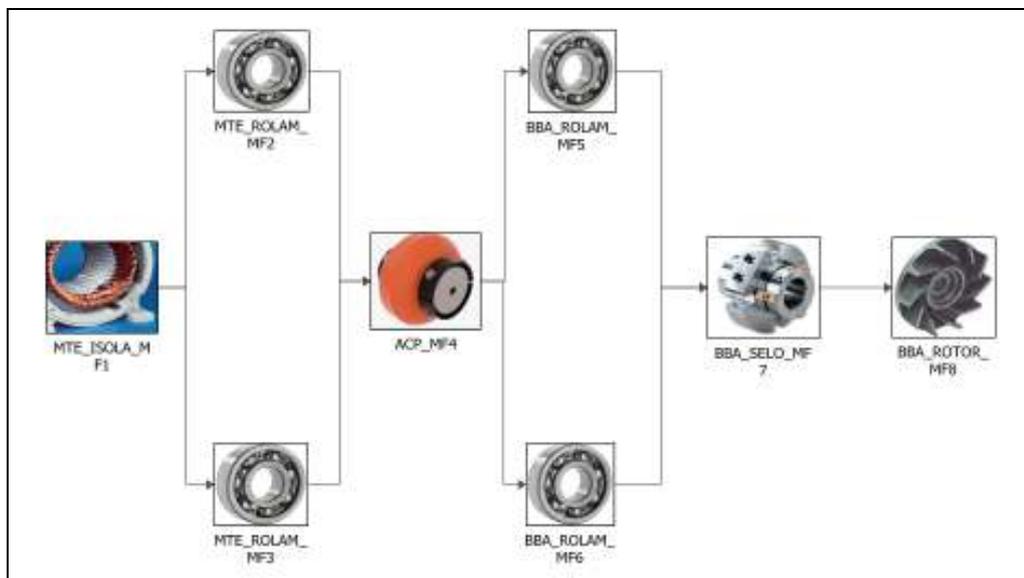


Fonte: O autor (2019).

## 4.2 DIAGRAMA DE BLOCO P3144.

Iniciou-se a simulação da análise RAM com realização de uma representação do sistema, figura 4.16, que nesse caso será uma bomba centrífuga, através do diagrama de blocos, onde o objetivo é avaliar o desempenho do equipamento e seus componentes.

Figura 4.16 - Diagrama de bloco de uma bomba centrífuga P3144.



Fonte: O autor (2019).

Para a realização dessa análise foram identificados os principais componentes e alguns modos de falhas que causam perdas funcionais ao sistema (bomba), contudo para desenvolvimento desse trabalho vamos focar no componente selo mecânico, considerando apenas esse como passível de falhar, ou seja, confiabilidade variando no tempo, e os outros blocos como não falham ao longo do tempo, o que significa que a confiabilidade é constante.

A tabela 4.4 detalha esses componentes, seu modo de falha e parâmetros de distribuição de confiabilidade ajustados.

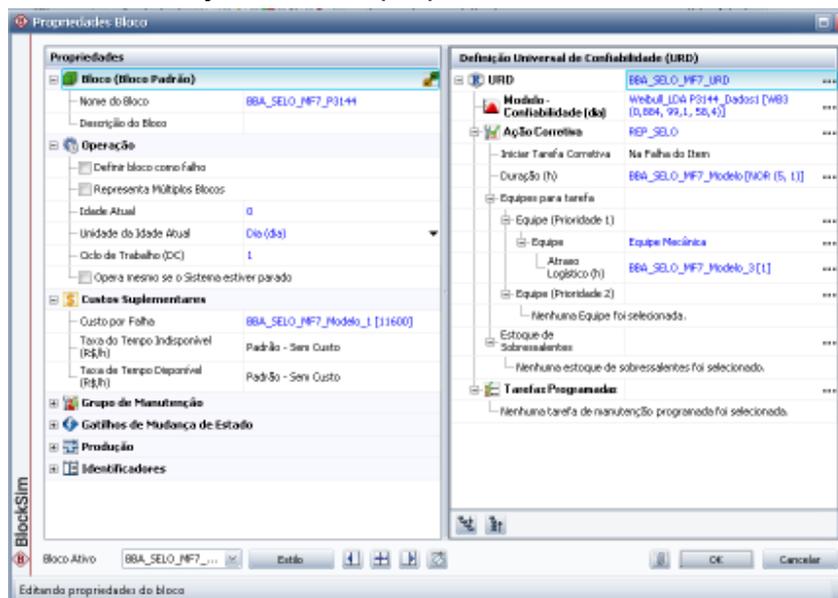
Tabela 4.4 - Dados de confiabilidade ajustados nos blocos para a simulação da P3144.

Nome Bloco	Modo de falha	Distribuição	$\beta$	$\eta$	$\gamma$	Comentário
MTE_ISOLA_MF1	Perda do isolamento elétrico	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
MTE_ROLAM_MF2	Travamento do rolamento	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
MTE_ROLAM_MF3	Travamento do rolamento	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
ACP_MF4	Rompimento do elemento elástico	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
BBA_ROLAM_MF5	Travamento do rolamento	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
BBA_ROLAM_MF6	Travamento do rolamento	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
BBA_SELO_MF7	Perda da vedação	3P-Weibull	0,88	99,15	58,38	-
BBA_ROTOR_MF8	Quebra das pás	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.

Fonte: O autor (2019).

O modelo de confiabilidade ajustados na propriedade do bloco BBA\_SELO\_MF7 foi o já calculado anteriormente na análise de LDA da bomba P3144. Para as simulações de ações corretivas, foi ajustado no bloco uma distribuição Normal (NOR) com uma média de 5 horas e um desvio padrão de 1 hora, um custo de material de R\$11.600,00 por falha ocorrida, também foi considerando um atraso logístico da equipe de manutenção de valor constante de 1 hora e um custo de HH<sub>MC</sub> ( Hora-Homem de manutenção corretiva ) igual à R\$80,00. A figura 4.17 podem ser visualizados esses parâmetros ajustados na ferramenta de simulação do *software BlockSim*.

Figura 4.17 - Parâmetros ajustados na propriedade do bloco do BlockSim.



Fonte: O autor (2019).

Com os ajustes definidos no bloco, iniciou-se a simulação do sistema, com um tempo final de 2 anos e resultados pontuais a cada 1 mês, o número de simulações foi padronizado em 3000, como podemos confirmar na figura 4.18.

Figura 4.18 - Ajustes do simulador da manutenibilidade / disponibilidade.



Fonte: O autor (2019).

Como resultado, figura 4.19, o software de simulação indicou que nos próximos 2 anos é esperado 4,27 falhas do sistema, ficando 728,93 dias disponíveis

e 1,06 dia indisponível para ações corretivas de manutenção, apesar da confiabilidade em 730 dias, fim da simulação, ser zero, o valor de disponibilidade média foi de 99,85%, isso demonstrar que, apesar das falhas a equipe de manutenção será capaz de repor o sistema em funcionamento sempre que ela ocorrer.

Figura 4.19 - Relatório da simulação gerado pelo BlockSim para a P3144.

<b>Resumo da Contagem do Evento</b>	
<b>Falhas do Sistema</b>	
Quantidade Esperada de Falhas:	4,279667
Desvio Padrão (Quantidade de Falhas):	1,282186
<b>Visão Geral do Sistema</b>	
<b>Geral</b>	
Disponibilidade Média (Todos Eventos):	0,998534
Desvio Padrão (Disponibilidade Média):	0,000457
Disponibilidade Média (sem MP, OC e Inspeção):	0,998534
Disponibilidade Pontual (Todos Eventos) em 730 dia:	0,999667
Confiabilidade em 730 dia:	0
Tempo Disponível (dia):	728,930147
Tempo Indisponível Total (dia):	1,069853
<b>Resumo de Custo</b>	
<b>Custos de Oportunidade</b>	
Custos da OnCondition (Total):	R\$ 0,00
<b>Custo Total</b>	
Custo Total do Sistema:	R\$ 54.265,90
<b>Receita</b>	
Receita Total:	R\$ 0,00

Fonte: O autor (2019).

Um outro dado importante apresentado no relatório da simulação, é quanto aos custos com materiais e mão de obra aplicados nas manutenções corretivas da bomba P3144, no caso, a simulação indicou um total de R\$54.265,90, ou seja, é esperado um desembolso nesse valor em manutenções corretivas. Esse dado é importante para que as equipe de engenharia de manutenção da unidade possam usá-los para viabilizar projetos de melhorias não somente focados em disponibilidade mas também em confiabilidade maiores.

#### 4.3 ANÁLISE RAM DA POSIÇÃO P5114

Já na posição 5114, a análise RAM começa com o levantamento dos dados de tempo de vida dos selos instalados na bomba centrífuga localizada na área

produtiva da Linha de Fibras. O valor total de ocorrências com selos mecânicos registradas no sistema CMMS é igual 11 quebras, de posse dos tempos de operação de cada selo, os valores dos tempos até falhas foram inseridos no Weibull ++ , conforme a figura 4.20.

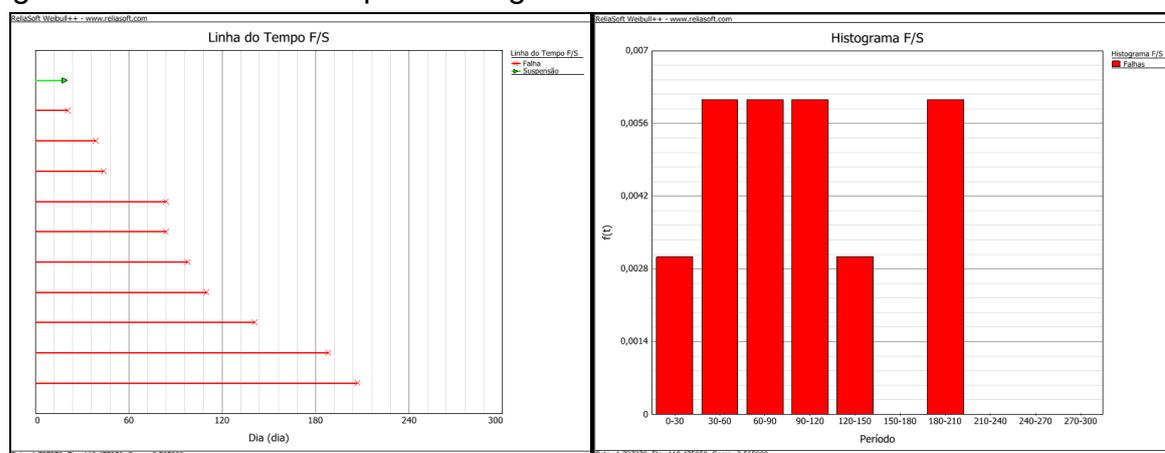
Figura 4.20 - Dados de vida inseridos no Weibull ++ para a posição P5114.

Quantidade	Condição F ou S	Tempo Operação (dia)	IDs Subconjunto 1
1	F	84	P5114
1	F	98	P5114
1	F	141	P5114
1	F	188	P5114
1	F	21	P5114
1	F	84	P5114
1	F	39	P5114
1	F	207	P5114
1	F	44	P5114
1	F	110	P5114
1	S	19	P5114

Fonte: O autor (2019).

A figura 4.21, gráfico esquerdo, apresentado abaixo é possível visualizar a linha do tempo, e também, gráfico direito, o histograma da distribuição de probabilidade da variável aleatória tempo até a falha, uma maneira ilustrativa de visualizar os dados de falhas(10) e suspensão(1).

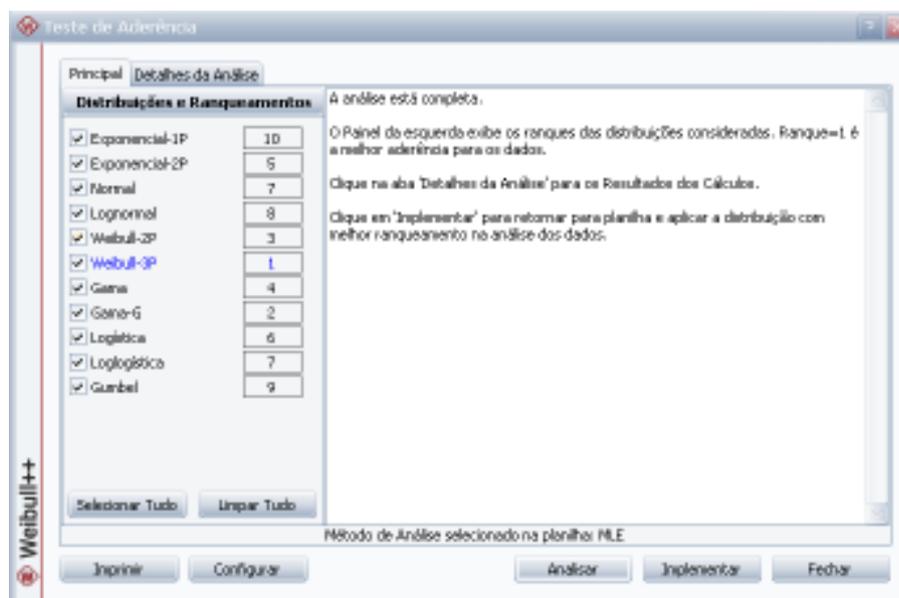
Figura 4.21 - Linha do tempo e Histograma dos dados da P5114..



Fonte: O autor (2019).

Realizado o teste de aderência do software, e como resultado dos ranques das distribuições, a Weibull-3P apresentou melhor aderência aos dados, figura 4.22, a mesma foi implementada.

Figura 4.22 - Teste de aderência aos dados da P5114.



Fonte: O autor (2019).

Com a implementação da distribuição Weibull-3P, os parâmetros de confiabilidade foram calculados e apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros da distribuição dos dados de vida. .

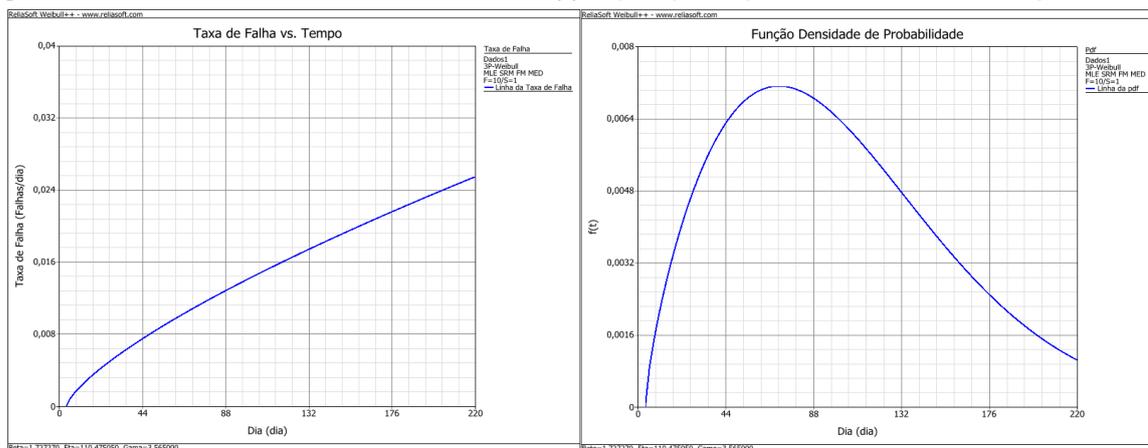
Parâmetro	Unidade	Valor
$\beta$ (Beta) =	-	1,72
$\eta$ (Eta) =	dia	110,47
$\Upsilon$ (Gama) =	dia	3,56
<b>MTTF =</b>	dia	102,03

Fonte: O autor (2019).

Com um  $\beta = 1,72$ , podemos observar através da figura 4.23, gráfico esquerdo, os efeitos do parâmetro de forma sobre a taxa de falha  $h(t)$  de uma distribuição Weibull, indicando um curva crescente, ou seja, um risco menor no início de vida e posteriormente um acréscimo com o tempo, indicando um comportamento de envelhecimento do componentes, contudo, os valores de MTTF indicam que o

componente tem falhado precocemente, diante a situação, foram consultados alguns registros, laudos emitidos por equipes especializadas em análise de falha de selo mecânico, nessa consulta foi comprovada a existência de indícios de problemas relacionados a projetos inadequados, mau uso do componente e manutenção inadequada. Também na figura 4.23, gráfico direito, é possível verificar a curva pdf com as distribuições de probabilidade da variável tempo até falha.

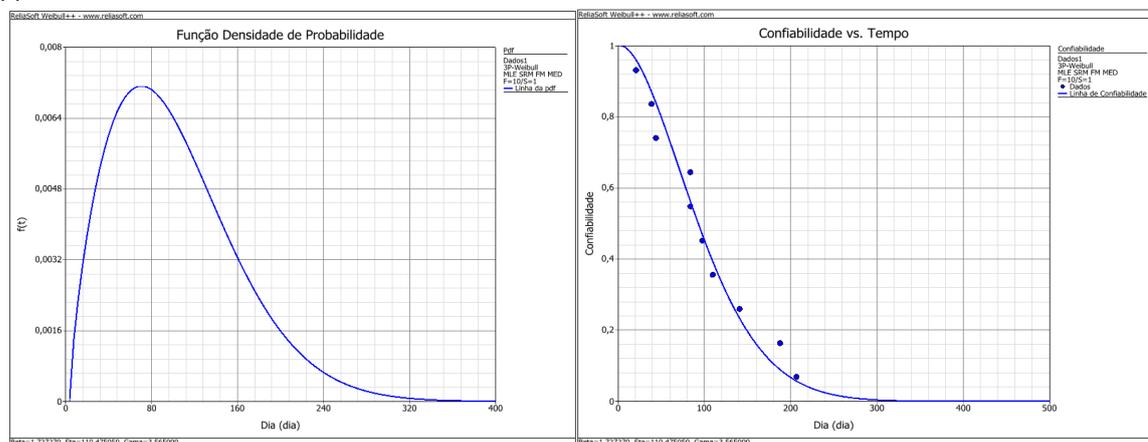
Figura 4.23 - Gráficos da taxa de falha  $h(t)$  e pdf para parâmetro de forma  $\beta = 1,72$ .



Fonte: O autor (2019).

A figura 4.24, demonstrar o comportamento das curvas de confiabilidade  $R(t)$ , gráfico esquerdo, e probabilidade acumulada de falha  $F(t)$ , gráfico direito, para a bomba P5114, com um MTTF de 102,33 dias, demonstrando uma baixa performance em relação a posições similares instaladas na planta.

Figura 4.24 - Gráficos de Confiabilidade  $R(t)$  e Probabilidade Acumulada de Falha  $F(t)$ .

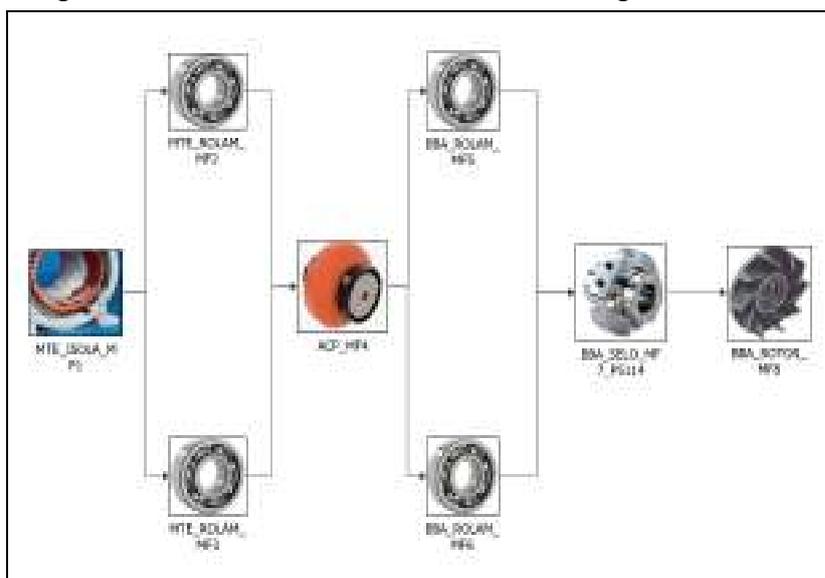


Fonte: O autor (2019).

#### 4.4 DIAGRAMA DE BLOCO P5114

Iniciou-se a simulação da análise RAM com realização uma representação do sistema, figura 4.25, que nesse caso será uma bomba centrífuga, através do diagrama de blocos, onde o objetivo é avaliar o desempenho do equipamento e seus componentes.

Figura 4.25 - Diagrama de bloco de uma bomba centrífuga P5114.



Fonte: O autor (2019).

Para a realização dessa análise foram identificados os principais componentes e alguns modos de falhas que causam perdas funcionais ao sistema (bomba), contudo para desenvolvimento desse trabalho vamos focar no componente selo mecânico, considerando apenas esse como passível de falhar, ou seja, confiabilidade variando no tempo, e os outros blocos como não falham ao longo do tempo, o que significa que a confiabilidade é constante. A tabela 4.6 detalha esses componentes, seu modo de falha e parâmetros de distribuição de confiabilidade ajustados.

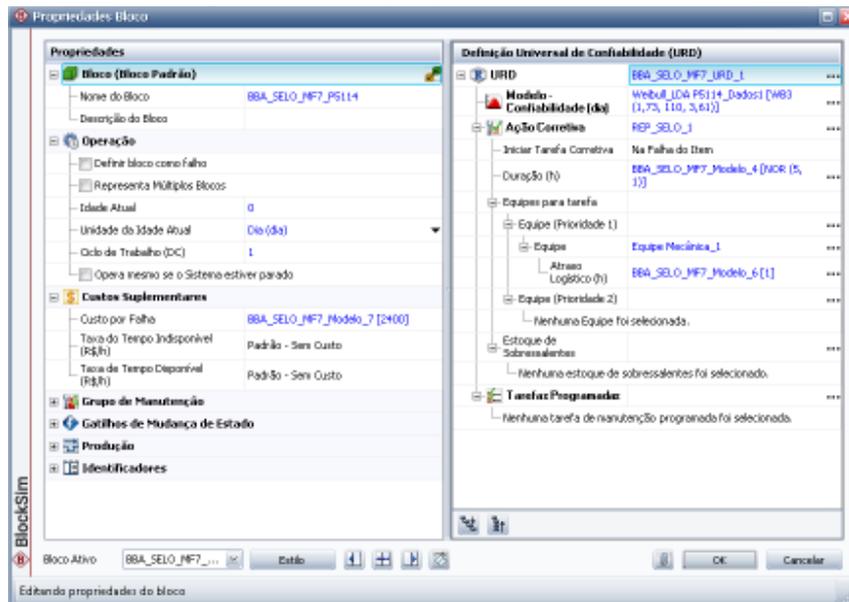
Tabela 4.6 - Dados de confiabilidade ajustados nos blocos para a simulação da P5114.

Nome Bloco	Modo de falha	Distribuição	$\beta$	$\eta$	$\gamma$	Comentário
MTE_ISOLA_MF1	Perda do isolamento elétrico	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
MTE_ROLAM_MF2	Travamento do rolamento	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
MTE_ROLAM_MF3	Travamento do rolamento	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
ACP_MF4	Rompimento do elemento elástico	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
BBA_ROLAM_MF5	Travamento do rolamento	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
BBA_ROLAM_MF6	Travamento do rolamento	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
BBA_SELO_MF7	Perda da vedação	3P-Weibull	1,72	110,41	3,61	-
BBA_ROTOR_MF8	Quebra das pás	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.

Fonte: O autor (2019).

O modelo de confiabilidade ajustados na propriedade do bloco BBA\_SELO\_MF7 foi o já calculado anteriormente na análise de LDA da bomba P5114. Para as simulações de ações corretivas, foi ajustado no bloco uma distribuição Normal (NOR) com uma média de 5 horas e um desvio padrão de 1 hora, a um custo de material de R\$2.400,00 por falha ocorrida, também foi considerando um atraso logístico da equipe de manutenção de valor constante de 1 hora e um custo de HH<sub>MC</sub> ( Hora-Homem de Manutenção Corretiva ) igual à R\$80,00. A figura 4.26 podem ser visualizados esses parâmetros ajustados na ferramenta de simulação do software BlockSim.

Figura 4.26 - Parâmetros ajustados na propriedade do bloco do BlockSim.



Fonte: O autor (2019).

Com os ajustes definidos no bloco, iniciou-se a simulação do sistema, com um tempo final de 2 anos e resultados pontuais a cada 1 mês, o número de simulações foi padronizado em 3000, conforme figura 4.27.

Figura 4.27 - Ajustes do simulador da manutenibilidade / disponibilidade.



Fonte: O autor (2019).

Como resultado, figura 4.28, o software de simulação indicou que nos próximos 2 anos é esperado 6,86 falhas do sistema, ficando 728,93 dias disponíveis

e 1,71 dia indisponível para ações corretivas de manutenção, apesar da confiabilidade em 730 dias ser zero, o valor de disponibilidade média foi de 99,8%, isso demonstrar que, apesar das falhas, a equipe de manutenção será capaz de repor o sistema em funcionamento sempre que ela ocorrer.

Figura 4.28 - Relatório da simulação gerado pelo BlockSim para a P5114.

<b>Resumo da Contagem do Evento</b>	
<b>Falhas do Sistema</b>	
Quantidade Esperada de Falhas:	6,862
Desvio Padrão (Quantidade de Falhas):	1,561763
<b>Visão Geral do Sistema</b>	
<b>Geral</b>	
Disponibilidade Média (Todos Eventos):	0,997651
Desvio Padrão (Disponibilidade Média):	0,000554
Disponibilidade Média (sem MP, OC e Inspeção):	0,997651
Disponibilidade Pontual (Todos Eventos) em 730 dia:	0,998
Confiabilidade em 730 dia:	0
Tempo Disponível (dia):	728,285073
Tempo Indisponível Total (dia):	1,714927
<b>Resumo de Custo</b>	
<b>Custos de Oportunidade</b>	
Custos da OnCondition (Total):	R\$ 0,00
<b>Custo Total</b>	
Custo Total do Sistema:	R\$ 23.877,28
<b>Receita</b>	
Receita Total:	R\$ 0,00

Fonte: O autor (2019).

Um outro dado importante apresentado no relatório da simulação, é quanto aos custos com materiais e mão de obra aplicadas nas manutenções corretivas da bomba P3144, no caso a simulação indicou um total de R\$23.877,28, ou seja, é esperado um desembolso nesse valor em manutenções corretivas. Esses dados são importantes para que as equipes de engenharia de manutenção da unidade possam usá-los para viabilizar projetos de melhorias não somente focados em disponibilidade e também em uma confiabilidade maior.

#### 4.5 ANÁLISE RAM DA POSIÇÃO P2015.

A análise RAM começa com o levantamento dos dados de tempo de vida da bomba centrífuga instalada na posição P2015, localizada na área produtiva da Secagem. O valor total de ocorrências com selos mecânicos registradas no sistema CMMS é igual 10 quebras, de posse dos tempos de operação de cada selo, os valores dos tempos até falhas foram inseridos no Weibull ++ , conforme a figura 4.29.

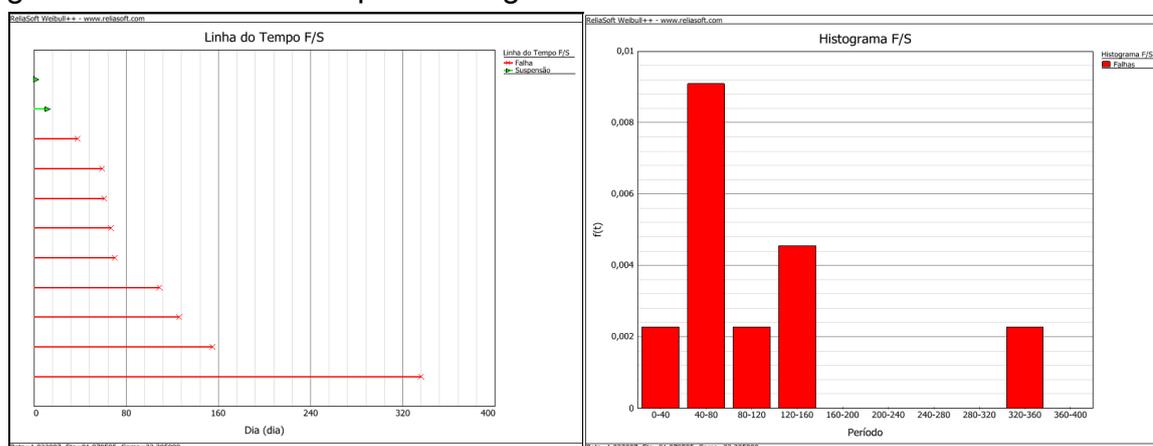
Figura 4.29 - Dados de vida inseridos no Weibull ++ para a posição P2015.

Quantidade	Condição F ou S	Tempo Operação (dia)	IDs Subconjunto 1
1	F	155	P2015
1	F	61	P2015
1	F	59	P2015
1	F	126	P2015
1	F	109	P2015
1	F	70	P2015
1	F	67	P2015
1	F	38	P2015
1	S	2	P2015
1	F	336	P2015
1	S	12	P2015

Fonte: O autor (2019).

Na figura 4.30, apresentada abaixo, é possível visualizar os gráficos de linha do tempo, gráfico esquerdo, e também o histograma da distribuição de probabilidade da variável aleatória tempo até a falha, gráfico direito, uma maneira ilustrativa de visualizar os dados de falhas(9) e suspensões(2).

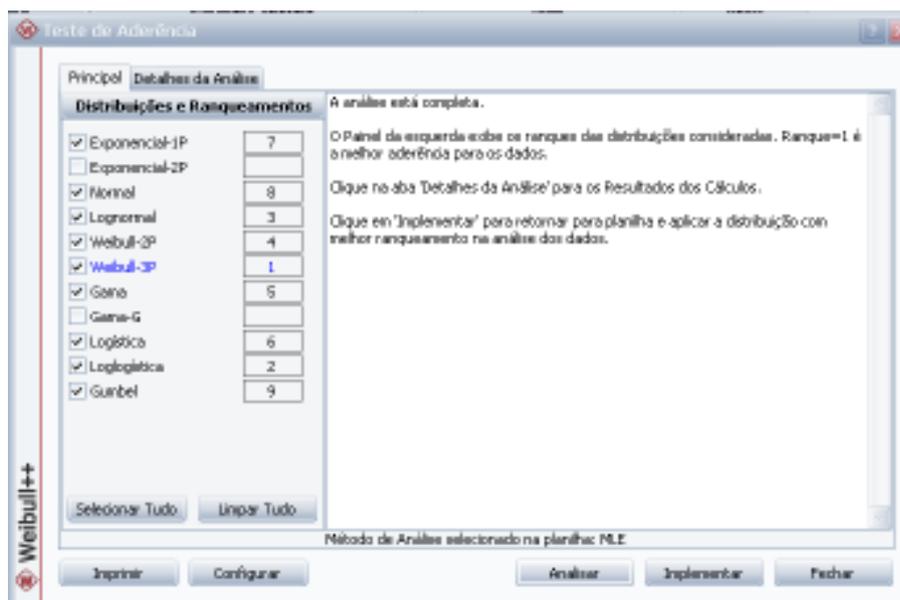
Figura 4.30 - Linha do tempo e Histograma dos dados da P2015.



Fonte: O autor (2019).

Realizado o teste de aderência do software, e como resultado dos ranques das distribuições, optou-se em usar a distribuição Weibull-3P, visto que a mesma foi usada nas duas análises anteriores, figura 4.31.

Figura 4.31 - Teste de aderência aos dados da P2015.



Fonte: O autor (2019).

Com a implementação da distribuição Weibull-3P, os parâmetros de confiabilidade foram calculados e apresentados na tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Parâmetros da distribuição dos dados de vida.

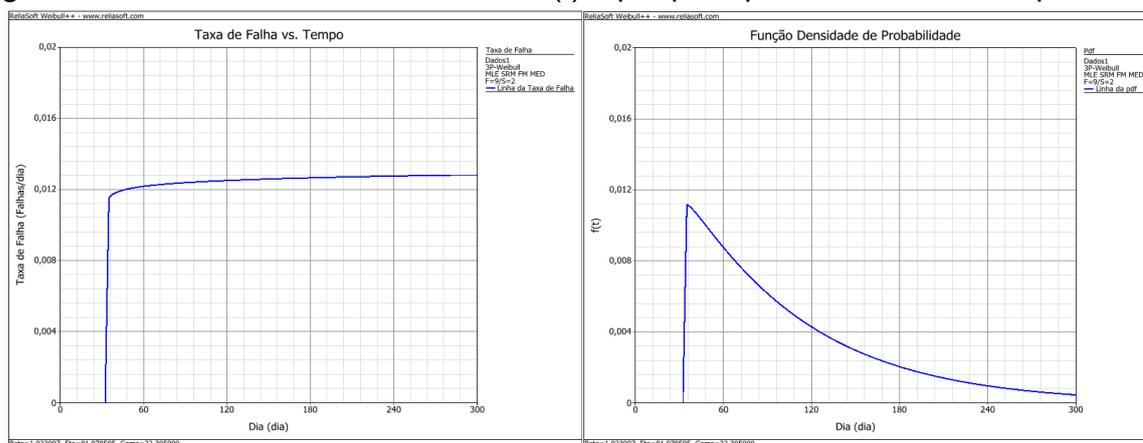
Parâmetro	Unidade	Valor
$\beta$ (Beta) =	-	1,02
$\eta$ (Eta) =	dia	81,87
$\Upsilon$ (Gama) =	dia	32,30
<b>MTTF =</b>	dia	113,52

Fonte: O autor (2019).

Com um  $\beta = 1,02$ , podemos observar através da figura 4.32, os efeitos do parâmetro de forma sobre a taxa de falha  $h(t)$  de uma distribuição Weibull, indicando uma curva levemente crescente, considerada uma reta, ou seja, um risco constante ao longo do tempo, indicando um comportamento aleatório, contudo, os valores de

MTTF indicam que o componente tem falhado precocemente, diante a situação, foram consultados alguns registros, laudos, emitidos por equipe especializada em análise de falha de selo mecânico, nessa consulta foi comprovada a existência de indícios de problemas relacionados a projetos inadequados. Também na figura 4.32 é possível verificar a curva pdf com as distribuições de probabilidade na variável tempo até falha.

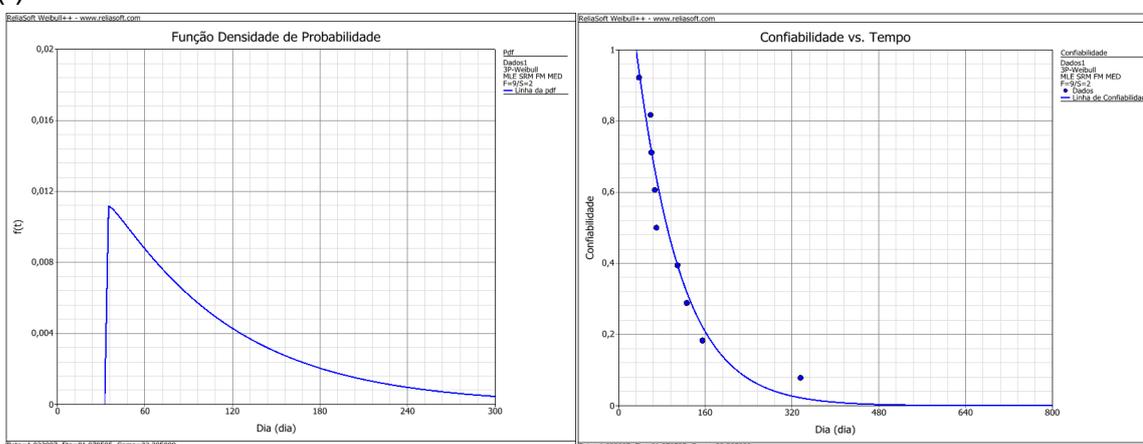
Figura 4.32 - Gráficos da taxa de falha  $h(t)$  e pdf para parâmetro de forma  $\beta = 1,02..$



Fonte: O autor (2019).

A figura 4.33, demonstrar o comportamento das curvas de confiabilidade  $R(t)$  e probabilidade acumulada de falha  $F(t)$  para a bomba P2015, com um MTTF de 113,52 dias, demonstrando uma baixa performance em relação a posições similares instaladas na planta.

Figura 4.33 - Gráficos de Confiabilidade  $R(t)$  e Probabilidade Acumulada de Falha  $F(t)$

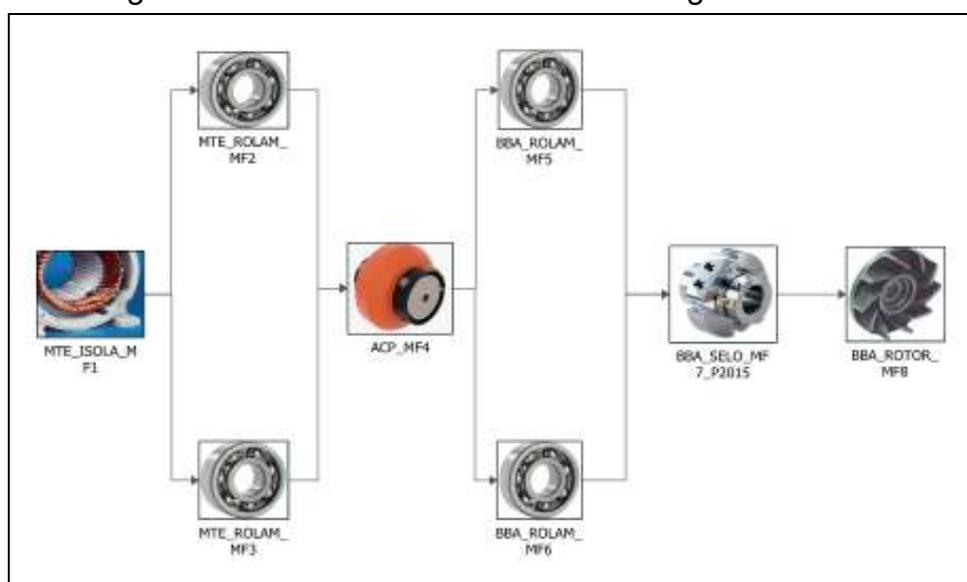


Fonte: O autor (2019).

#### 4.6 DIAGRAMA DE BLOCO P2015.

Iniciou-se a simulação da análise RAM com realização uma representação do sistema, figura 4.34, que nesse caso será uma bomba centrífuga, através do diagrama de blocos, onde o objetivo é avaliar o desempenho do equipamento e seus componentes.

Figura 4.34 - Diagrama de bloco de uma bomba centrífuga P2015.



Fonte: O autor (2019).

Para a realização dessa análise foram identificados os principais componentes e alguns modos de falhas que causam perdas funcionais ao sistema (bomba), contudo para desenvolvimento desse trabalho vamos focar no componente selo mecânico, considerando apenas esse como passível de falhar, ou seja, confiabilidade variando no tempo, e os outros blocos como não falham ao longo do tempo, o que significa que a confiabilidade é constante. A tabela 4.8 detalha esses componentes, seu modo de falha e parâmetros de distribuição de confiabilidade ajustados.

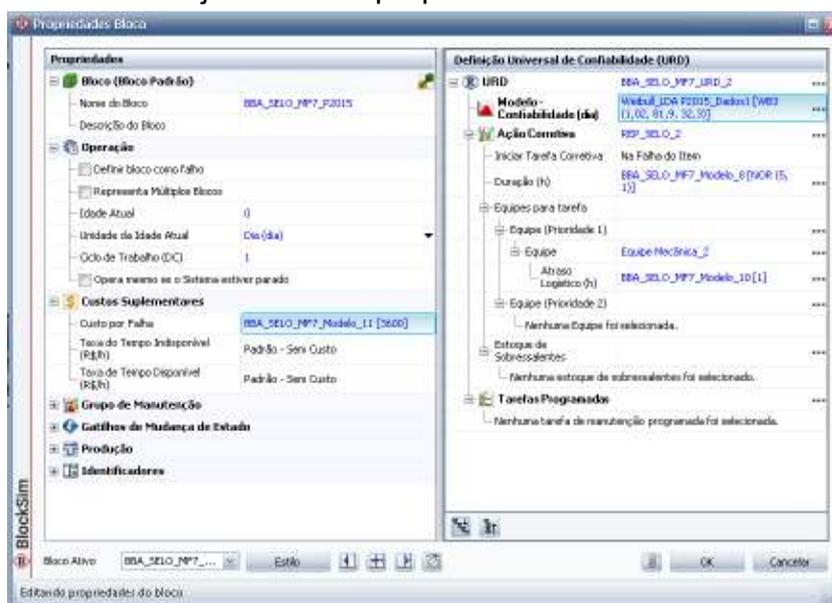
Tabela 4.8 - Dados de confiabilidade ajustados nos blocos para a simulação da P2015.

Nome Bloco	Modo de falha	Distribuição	$\beta$	$\eta$	$\gamma$	Comentário
MTE_ISOLA_MF1	Perda do isolamento elétrico	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
MTE_ROLAM_MF2	Travamento do rolamento	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
MTE_ROLAM_MF3	Travamento do rolamento	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
ACP_MF4	Rompimento do elemento elástico	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
BBA_ROLAM_MF5	Travamento do rolamento	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
BBA_ROLAM_MF6	Travamento do rolamento	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.
BBA_SELO_MF7	Perda da vedação	3P-Weibull	1,02	81,90	32,34	-
BBA_ROTOR_MF8	Quebra das pás	-	-	-	-	R = Constante Bloco não falha.

Fonte: O autor (2019).

O modelo de confiabilidade ajustados na propriedade do bloco BBA\_SELO\_MF7 foi o já calculado anteriormente na análise de LDA da bomba P5114. Para as simulações de ações corretivas, foi ajustado no bloco uma distribuição Normal (NOR) com uma média de 5 horas e um desvio padrão de 1 hora, a um custo de material de R\$3.600,00 por falha ocorrida, também foi considerando um atraso logístico da equipe de manutenção de valor constante de 1 hora e um custo de HH<sub>MC</sub> ( Hora-Homem de manutenção corretiva ) igual à R\$80,00. A figura 4.35 pode ser visualizados esses parâmetros ajustados na ferramenta de simulação do software BlockSim.

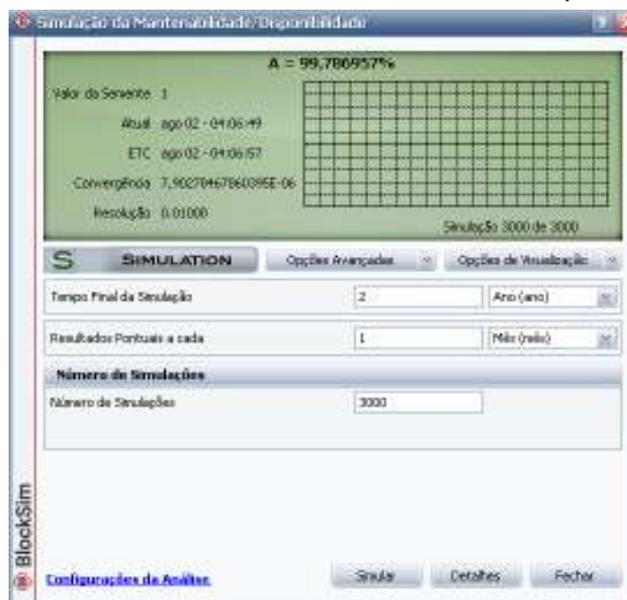
Figura 4.35 - Parâmetros ajustados na propriedade do bloco do BlockSim.



Fonte: O autor (2019).

Com os ajustes definidos no bloco, iniciou-se a simulação do sistema, com um tempo final de 2 anos e resultados pontuais a cada 1 mês, o número de simulações foi padronizado em 3000, conforme figura 4.36.

Figura 4.36 - Ajustes do simulador da manutenibilidade / disponibilidade.



Fonte: O autor (2019).

Como resultado, figura 4.37, o software de simulação indicou que nos próximos 2 anos é esperado 6,21 falhas do sistema, ficando 728,44 dias disponíveis

e 1,55 dia indisponível para ações corretivas de manutenção, apesar da confiabilidade em 730 dias ser zero, o valor de disponibilidade média foi de 99,86%, isso demonstra que, apesar das falhas, a equipe de manutenção será capaz de repor o sistema em funcionamento sempre que ela ocorrer.

Figura 4.37 - Relatório da simulação gerado pelo BlockSim para a P2015.

<b>Resumo da Contagem do Evento</b>	
<b>Falhas do Sistema</b>	
Quantidade Esperada de Falhas:	6,217667
Desvio Padrão (Quantidade de Falhas):	1,725673
<b>Visão Geral do Sistema</b>	
<b>Geral</b>	
Disponibilidade Média (Todos Eventos):	0,99787
Desvio Padrão (Disponibilidade Média):	0,00061
Disponibilidade Média (sem MP, OC e Inspeção):	0,99787
Disponibilidade Pontual (Todos Eventos) em 730 dia:	0,998667
Confiabilidade em 730 dia:	0
Tempo Disponível (dia):	728,444788
Tempo Indisponível Total (dia):	1,555212
<b>Resumo de Custo</b>	
<b>Custos de Oportunidade</b>	
Custos da OnCondition (Total):	R\$ 0,00
<b>Custo Total</b>	
Custo Total do Sistema:	R\$ 29.102,11
<b>Receita</b>	
Receita Total:	R\$ 0,00

Fonte: O autor (2019).

Um outro dado importante apresentado no relatório da simulação, é quanto aos custos com material e mão de obra aplicados nas manutenções corretivas da bomba P2015, no caso, a simulação indicou um total de R\$29.102,11, ou seja, é esperado um desembolso nesse valor em manutenções corretivas. Esse dado é importante para que a equipe de engenharia de manutenção da unidade possam usá-lo para viabilizar projetos de melhorias não somente focados em disponibilidade e também em confiabilidade maiores.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo sintetiza os resultados obtidos e estabelece os comparativos dos comportamentos de vida dos equipamentos estudados e avaliados conforme metodologia apresentada no capítulo 4.

É importante lembrar que, apesar do objetivo geral desse trabalho ser a demonstração da importância do estudo de confiabilidade para a redução do número de quebras prematuras de selos mecânicos instalados em bombas centrífugas, com foco em posições que apresentam os menores MTTF. As análises dos registros de quebras de todas as posições proporcionaram uma visão sistêmica aos engenheiros de manutenção da planta, demonstrando o comportamento temporal do número de quebras ao longo dos anos (3 anos), e também uma visão geográfica das áreas com maior número de ocorrências.

Já as análises de confiabilidade realizadas nas três posições com maior número de falhas registradas, demonstraram que os conceitos e técnicas estatísticas de análises de dados de vida quando combinados e utilizadas de forma adequada, são excelentes fontes de informação para obtenção do conhecimento da vida estimada em termos de probabilidades dos componentes ( selos mecânicos ) de forma geral.

Um outro dado importante, são os apresentados nos relatórios das simulações, principalmente as informações quanto aos custos com materiais e mão de obra aplicadas nas manutenções corretivas das três posições com menor MTTF, bombas P5114, P3144 e P2015. No caso, as simulações indicaram que nos próximos 3 anos, se não houver mudanças, há uma estimativa de desembolso de um total de mais de R\$107.000,00 em manutenções corretivas somente com essas três posições. Esse dado é importante para que as equipes de engenharia de manutenção da unidade possam usá-lo para viabilizar projetos de melhorias não somente focados em disponibilidade, mas também, em confiabilidade maiores.

Diante dos resultados observados e principalmente das inspeções realizadas em campo, foram possíveis identificar oportunidades de melhorias que irão proporcionar além da redução do número de quebras, maior confiabilidade dos equipamentos e instalações mais seguras.

- a) Criação de rotas operacionais para a inspeção de variáveis como vazão e pressão de água de selagem;
- b) Treinamento das equipes de operação e manutenção;
- c) Padronização das fichas de quebras;
- d) Criar procedimentos de análise das falhas selos, envolvendo principalmente as equipes de engenharia de confiabilidade.

## REFERÊNCIAS

PINTO, Alan Kardec; XAVIER, Júlio de Aquino Nascif. **Manutenção: função estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark , 2012.

AFFONSO, Luiz Otávio Amaral. **Equipamentos Mecânicos** : análise de falhas e solução de problemas. Rio de Janeiro: Qualitymark , 2006.

LIMA, Epaminondas Pio Correia: **Mecânicas das Bombas**. Rio de Janeiro: Interciência:Petrobras, 2001.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2009.

RELIASOFT. **Life Data Analysis Reference**. Tucson: Reliasoft Corporation, 2015.

RELIASOFT BRASIL: **G400A – Weibull e Análise de Dados de Vida**. São Paulo (SP), 2018.

MAZZEI, Denis. **RAM Analysis** . Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2019.

LEEMIS, L. **Reliability: probabilistic models and statistical methods**. Nova York: Prentice - Hall, 384p., 1995.

KNIGHT, C.R. **Four Decades of Reliability Progress**. Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. [S.l.]: IEEE Reliability Society, 1991. p. 156-159.

BLANCHARD, Benjamin S., FABRYCKY, Wolter J., **Systems Engineering and Analysis**, Prentice Hall International Series in Industrial & Systems Engineering, 1990, p.346-347.

RIGONI, Emerson. **Manutenção Centrada na Confiabilidade**. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2019.

MARIANO, Carlos Henrique; RIGONI, Emerson . **Análise de Dados de Vida ( LDA – Life Data Analysis )** . Parte 2. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2018.

MDIC - **Comex Vis**: Principais Produtos Exportados – Celulose. Disponível em <<http://www.mdic.gov.br/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/comex-vis/frame-ppe?ppe=2203>> . Acesso em: 23 Mai. 2019.

RESTREPO, Alfredo ; YUZAK , Ertan . **O PAPEL** - Considerações práticas acerca da aplicação de sistemas híbridos de controle avançado na indústria de celulose, São Paulo, Vol 70, num.12, p. 35-51, Dez.2009.