

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

**FÁBIO LAZZARINE PERUCHI**

**ANÁLISE DAS CAUSAS RAÍZES DE FALHA DE UMA BOMBA  
CENTRÍFUGA DE MÉDIA CONSISTÊNCIA APLICADA NA ÁREA DE  
BRANQUEAMENTO DE POLPA DE CELULOSE**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2019**

**FÁBIO LAZZARINE PERUCHI**

**ANÁLISE DAS CAUSAS RAÍZES DE FALHA DE UMA BOMBA  
CENTRÍFUGA DE MÉDIA CONSISTÊNCIA APLICADA NA ÁREA DE  
BRANQUEAMENTO DE POLPA 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. MSc. Wanderson Stael Paris

**CURITIBA**

**2019**



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE DAS CAUSAS RAÍZES DE FALHA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA DE MÉDIA CONSISTÊNCIA APLICADA NA ÁREA DE BRANQUEAMENTO DE POLPA DE CELULOSE**

**FÁBIO LAZZARINE PERUCHI**

Esta monografia foi apresentada em 05 de outubro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Wanderson Stael Paris MSc.  
Professor Orientador - UTFPR

---

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

---

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

Dedico este trabalho a toda minha família, especialmente a minha esposa Eliani Carrara Milani Peruchi, minha filha Elisa Milani Peruchi e aos meus pais Antônio Peruchi Filho e Lucinda Maria Lazzarine.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força para cumprir mais essa missão, agradeço à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Agradeço ao meu orientador Prof. MSc. Wanderson Stael Paris, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Agradeço aos meus colegas de sala pelos momentos de aprendizagem e descontração. Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista.” (Aldo Novak)

## RESUMO

PERUCHI, Fábio Lazzarine. **Análise das Causas Raízes de Falha uma Bomba Centrífuga de Média Consistência Aplicada na Área de Branqueamento de Polpa de Celulose**. 2019. 53 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Bombas centrífugas de média consistência são amplamente utilizadas na indústria de Celulose e Papel. Em geral esses equipamentos possuem elevado número de intervenções e perda de produção. O objetivo desse trabalho é elaborar um estudo de Engenharia da Confiabilidade para uma bomba centrífuga de média consistência aplicada na área de branqueamento de celulose, a fim de identificar as causas do baixo MTBF (*Mean Time Between Failures*) e conseqüentemente baixa confiabilidade. Os principais métodos adotados foram o levantamento do histórico de falhas dessa bomba desde sua instalação em 2007 até dezembro de 2018, utilização do software da Reliasoft para geração das curvas de confiabilidade e aplicação do RCM (*Reliability Centered Maintenance*) para levantar as causas raízes dos principais modos de falha identificados e propor ações para mitigação das causas raízes para aumentar a confiabilidade da BMC (Bomba Centrífuga de Média Consistência).

**Palavras-chave:** Confiabilidade. Celulose e Papel. Bomba Centrífuga.

## **ABSTRACT**

**PERUCHI, Fábio Lazzarine. Root Cause Analysis Failure of a Medium Consistency Centrifugal Pump Applied to the Cellulose Pulp Bleaching Area.** 2019. 53 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Medium-consistency centrifugal pumps are widely used in the pulp and paper industry. In general, such equipment has a high number of interventions and a loss of production. The objective of this work is to elaborate a Reliability Engineering study for a medium consistency centrifugal pump applied in the area of cellulose bleaching, in order to identify the causes of low MTBF (Mean Time Between Failures) and consequently low reliability. The main methods adopted were the history of failure of this pump from its installation in 2007 until December 2018, using Reliasoft software to generate Reliability Centered Maintenance (RCM) reliability and application curves to address the root causes of major identified failure modes and propose actions to mitigate root causes to increase the reliability of BMC (Medium Consistency Centrifugal Pump).

**Keywords:** Reliability. Cellulose and paper. Centrifugal pump.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Efeito na confiabilidade causado pelo BEP .....	15
Figura 02 – Ilustração do processo Kraft.....	19
Figura 03 – Classificação geral das bombas.....	24
Figura 04 – Instalação de uma BMC e bomba de vácuo.....	25
Figura 05 – Principais componentes de bomba centrífuga .....	25
Figura 06 – Base de fundação .....	27
Figura 07 – Tubulação suportada.....	28
Figura 08 – Fluxo do processo onde está instalada a BMC .....	31
Figura 09 – Exemplo de estrutura de FTA .....	39
Figura 10 – Planilha de dados inseridos no software Weibull .....	42
Figura 11 – Diagrama de blocos construído no software BlockSim .....	42
Figura 12 – Simulação do diagrama de blocos no BlockSim .....	43
Figura 13 – Resultado de manutenibilidade, confiabilidade, e disponibilidade do diagrama de blocos no BlockSim .....	44
Figura 14 – Probabilidade de falha do acoplamento .....	45
Figura 15 – Probabilidade de falha do mancal .....	46
Figura 16 – Representação do FTA geral .....	46
Figura 17 – FTA do mancal.....	47
Figura 18 – FTA do acoplamento.....	47

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 01 – Disponibilidade de cada bloco construído no BlockSim.....	44
Gráfico 02 – Tempo indisponível de cada bloco construído no BlockSim .....	45

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 01 – Planilha padrão de modelagem.....	41
Quadro 02 – Plano de ação.....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEP	<i>Best Efficiency Point</i>
BMC	Bomba Centrífuga de Média Consistência
DBC	Diagrama de Bloco de Confiabilidade
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
LDA	<i>Life Data Analysis</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
pdf	Função de Densidade de Probabilidade
cdf	Função Distribuição Acumulada
RAM	<i>Reliability, Availability, Maintainability analysis</i>
RBD	<i>Reliability Block Diagram</i>
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
RS DECI	Índice de Criticidade dos Eventos que Provocaram Indisponibilidade
RS DTCl	Índice de Criticidade da Indisponibilidade do Sistema
RS FCI	Índice de Criticidade de Falha
SAP	<i>Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung</i>
TMEF	Tempo Médio Entre Falhas

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$  - média dos tempos de falha

$\sigma$  - desvio padrão para os tempos de falha

$\beta$  - parâmetro de forma

$\eta$  - parâmetro de escala, ou vida característica

$\gamma$  = parâmetro de posição ou deslocamento

$\lambda$  - Taxa de falhas

$e$  - Função exponencial

$t$  - Tempo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA .....	15
1.2	OBJETIVOS .....	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos .....	16
1.3	JUSTIFICATIVA .....	16
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	17
<b>2</b>	<b>BOMBAS CENTRÍFUGAS NA INDÚSTRIA DE CELULOSE.....</b>	<b>19</b>
2.1	INDÚSTRIA DE CELULOSE .....	19
2.1.1	Produção de Cavaco .....	20
2.1.2	Linha de Fibras.....	20
2.1.2.1	Cozimento .....	21
2.1.2.2	Lavagem.....	21
2.1.2.3	Depuração .....	22
2.1.2.4	Deslignificação .....	22
2.1.2.5	Branqueamento .....	22
2.1.2.6	Planta Química .....	23
2.1.3	Secagem .....	23
2.2	BOMBAS CENTRÍFUGAS .....	23
2.2.1	Definição de Bombas Centrífugas.....	23
2.2.2	Bombas Centrífugas de Média Consistência.....	24
2.2.3	Funcionamento das Bombas Centrífugas .....	25
2.2.4	Instalação, Operação e Manutenção de Bombas Centrífugas .....	26
2.2.4.1	Instalação .....	26
2.2.4.2	Operação.....	28
2.2.4.3	Manutenção.....	29
2.2.5	Aplicação da BMC no Processo .....	30
2.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	31
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>33</b>
3.1	CONFIABILIDADE.....	33
3.2	MANTENABILIDADE.....	33
3.3	DISPONIBILIDADE .....	33
3.4	FALHA.....	34
3.5	MODELOS PROBABILÍSTICOS .....	34
3.5.1	Distribuição Normal .....	34
3.5.2	Distribuição Log-Normal .....	35
3.5.3	Distribuição Weibull .....	36
3.5.4	Distribuição Exponencial .....	36
3.6	TAXA DE FALHA.....	37
3.7	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA .....	37
3.8	DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE (RBD).....	38
3.9	TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS (TMEF).....	38
3.10	ANÁLISE POR ÁRVORE DE FALHA (FTA).....	39
3.11	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	40
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DA CONFIABILIDADE E RESULTADOS .....</b>	<b>41</b>

4.1	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>49</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS .....	49
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>

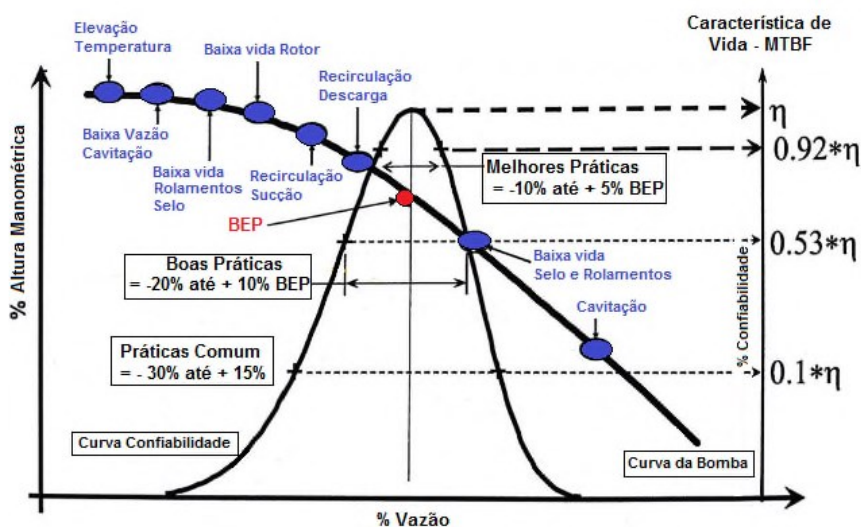
## 1 INTRODUÇÃO

Em uma época onde a competitividade de mercado está muito acirrada e os processos produtivos são cada vez mais de alto desempenho e envolvendo grande valor financeiro para as indústrias, a confiabilidade de que esses processos vão desempenhar as funções para as quais eles foram projetados é vital, ou seja, conhecer a confiabilidade de um ativo e o que esta representa para o processo é de fundamental importância para estratégia de produção quando se visa o máximo de retorno sobre o capital investido. Neste contexto que entra a Engenharia da Confiabilidade aplicando técnicas de análise de confiabilidade com foco na predição da probabilidade de falhas e na garantia da integridade e segurança dos ativos da empresa.

Uma vez que as fábricas de Celulose e Papel possuem grande base de ativos formada por bombas centrífugas de média consistência (BMC), foi iniciado um estudo dedicado às mesmas. Nesse estudo foi considerada uma BMC, tag 26-3223-164, aplicada em uma área de branqueamento de polpa de celulose. O branqueamento é uma das etapas da produção de celulose que consiste em remover as impurezas que dão cor à celulose através da adição de químicos.

As BMC's são projetadas para trabalhar a uma determinada vazão com uma determinada altura manométrica. A escolha da bomba é determinada em função do ponto de melhor eficiência BEP (do inglês *Best Efficiency Point*), ou seja, quando a bomba trabalha nessa vazão seu rendimento máximo é obtido para um dado diâmetro do rotor. O não atendimento de algumas condições básicas e específicas de projeto, instalação, manutenção e operação prejudicam o funcionamento da bomba, conforme apresentado na figura 01.

Figura 01 - Efeito na confiabilidade causado pelo BEP



Fonte: Bloch e Budris (2010)

O prejuízo pode ser comprovado pelos baixos valores de MTBF dessas bombas e conseqüentemente baixa confiabilidade das mesmas.

### 1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

A competitividade de mercado está muito acirrada o que afeta o comportamento das empresas. Para que a empresa atinja suas metas de produção, custo de manutenção e segurança há necessidade de determinar procedimentos que visam um maior aproveitamento dos recursos com foco na produtividade e eliminação dos eventos que geram perda de produção. Com uma visão de obtenção de resultados eficientes buscou-se realizar um estudo de confiabilidade em uma bomba de média consistência aplicada em posição crítica do processo, localizada na área do branqueamento de celulose.

A BMC objeto desse estudo é um equipamento de grande relevância para o processo de produção de celulose. No branqueamento de celulose quando ocorre falha dessa bomba gera prejuízo à companhia devido parada da área e conseqüente perda de produção.

Dentro dessa concepção buscou-se desenvolver um estudo de confiabilidade para propor melhorias capazes de aumentar o MTBF e reduzir significativamente a perda de produção causada por falhas inesperadas dessa BMC.



## 1.2 OBJETIVOS

Este item descreve o objetivo geral e os específicos referentes a esse estudo de confiabilidade.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Elaborar um estudo de causas raízes, de uma bomba centrífuga de média consistência aplicada na área do branqueamento de celulose, a fim de identificar as causas do baixo MTBF e conseqüentemente baixa confiabilidade. Através dessa análise pretende-se identificar as causas raízes dos principais modos de falha e propor ações para aumento do MTBF, redução de perdas de produção e aumento de confiabilidade.

### 1.2.2 Objetivo Específico

Para atingir o objetivo geral foram traçados os seguintes passos:

- Levantar o histórico de falhas da bomba desde o início de operação em 2007;
- Utilizar metodologia RAM aplicando a ferramenta FTA para mapeamento das causas raízes dos principais modos de falha identificados;
- Elaborar plano de ação utilizando ferramenta 5W2H para mitigação das causas raízes identificadas;
- Gerar as curvas de confiabilidade utilizando o software Reliasoft.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Conhecer a confiabilidade de um equipamento e o que esta representa para o processo é de fundamental importância à estratégia de produção quando se visa o máximo de retorno sobre o capital investido. A importância da confiabilidade, como um parâmetro de eficácia, está influenciando cada vez mais na tomada de decisão no que se refere à saúde financeira das empresas e deve ser cada vez mais fruto de

estudo e desenvolvimento de ferramentas de análise de dados. Os benefícios com a aplicação da confiabilidade são inumeráveis, porém cita-se os seguintes como os mais significativos (LAFRAIA, 2001):

- Menores custos de manutenção/operação/apoio;
- Menores perdas por lucros cessantes;
- Menores possibilidades de acidentes;
- Cumprimento da legislação ambiental;
- Continuidade operacional.

Neste contexto a Engenharia da Confiabilidade está sendo cada vez mais aplicada na indústria como ferramenta estratégica para predição da probabilidade de falhas e garantia da integridade dos ativos.

#### 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo de confiabilidade será elaborado para que a BMC 26-xxxx-164 desempenhe sua função dentro do processo produtivo de acordo com os parâmetros de projeto. Para isso foi utilizado a metodologia RCM, onde iniciou-se o trabalho com levantamento do histórico de falhas da BMC, no sistema SAP, e posterior tratamento e análise desses dados, com auxílio de métodos estatísticos e programas que auxiliaram na formatação do modelo matemático para estimar de modo probabilístico a confiabilidade do objeto deste estudo. O estudo de confiabilidade e análises estatísticas será através de cálculos e simulações com o software da Reliasoft (Weibull 18++ e BlockSim 18).

Para identificação das causas raízes dos modos de falhas levantados será adotado a ferramenta FTA. E no final será elaborado um plano de ação através da ferramenta 5W2H.

#### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco partes fundamentalmente, composto por introdução, área de aplicação, referencial teórico, desenvolvimento metodológicos, conclusão e referências.

O capítulo 1 apresenta uma introdução de forma sucinta sobre o tema do estudo, objetivos, justificativa e procedimentos metodológicos que serão adotados.

O capítulo 2 apresentará uma contextualização geral sobre a indústria de Celulose e Papel e uma conceituação de bombas.

O capítulo 3 apresentará os conceitos de Engenharia da Confiabilidade.

O capítulo 4 mostrará o histórico de falhas da BMC e abordará a metodologia de estudo adotada para alcançar o aumento da confiabilidade da bomba.

O capítulo 5 apresentará os resultados obtidos e a conclusão final do trabalho.

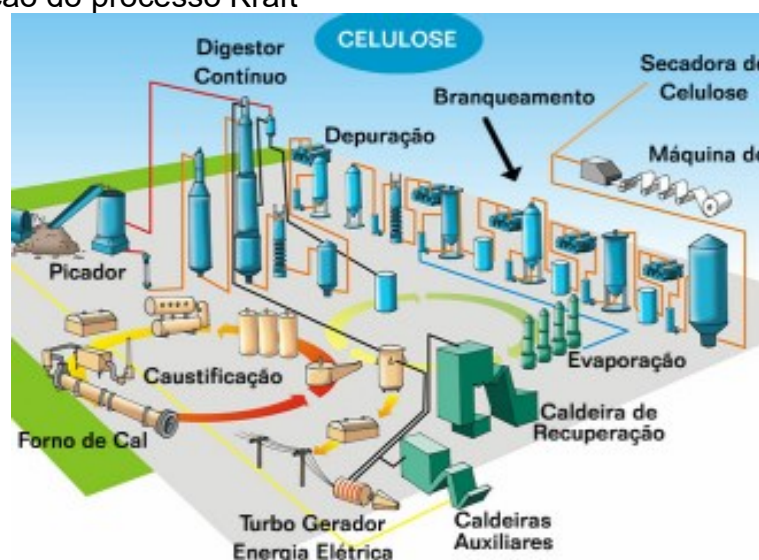
## 2 BOMBAS CENTRÍFUGAS NA INDÚSTRIA DE CELULOSE

O objetivo desse capítulo é abordar sobre a indústria de Celulose e aplicação de bombas centrífugas nesse processo.

### 2.1 INDÚSTRIA DE CELULOSE

O processo de produção de Celulose envolve todas as áreas ligadas ao processamento de madeira para obtenção da fibra. Essas áreas são Produção de Cavaco, Linha de Fibras e Secagem, conforme ilustrado na figura 02.

Figura 02 – Ilustração do processo Kraft



Fonte: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos> (2019)

A celulose é um polímero linear de glicose de alta massa molecular formado de ligações glicosídicas, insolúvel em água, sendo o principal componente, da parede celular da biomassa vegetal.

Segundo Valmet (2019), o processo de produção de celulose consiste na separação das fibras de celulose, através da remoção das substâncias que as unem. Para fazer essa separação, existem basicamente três processos:

- Processo Mecânico
- Processo Químico-Mecânico
- Processo Químico

O tema desse trabalho é referente a uma indústria que utiliza o processo químico. A celulose produzida por esse processo pode ser branqueada e por isso ela é utilizada em maior escala no mercado mundial. A produção de celulose pelo processo químico consiste basicamente em cozinhar a madeira a alta pressão na presença de um agente de cozimento cuja função é ajudar a quebrar as moléculas de lignina contidas na madeira, liberando assim as fibras de celulose.

### 2.1.1 Produção de Cavaco

O processo de produção de celulose tem início nas áreas florestais, onde as árvores são derrubadas, desganhadas e as toras cortadas, sendo que algumas fábricas realizam o descascamento na própria floresta, para depois enviá-las, normalmente por caminhões, até as unidades industriais, onde são armazenadas em pátio de estocagem de toras, para servir como reserva estratégica para eventuais interrupções no sistema transporte de madeira da floresta para a fábrica.

Na etapa de processamento as toras são lavadas para remoção do material argiloso aderido às cascas e à própria tora. Seguem-se as etapas de descascamento (caso as mesmas não tenham sido realizadas no campo) e na sequência as toras são conduzidas aos picadores para obtenção de cavacos de tamanho uniforme e dimensões bem definidas, que facilitem o processo de digestão. Os cavacos de madeira para celulose são então estocados em pilhas, onde constituem uma reserva estratégica da empresa, e transportados por correias transportadoras até os silos dos digestores, onde se inicia o processo de cozimento.

### 2.1.2 Linha de Fibras

A linha de fibras engloba as etapas de cozimento, lavagem, depuração, deslignificação, branqueamento e a planta química. A lavagem, depuração e deslignificação com oxigênio podem ser arranjadas em uma ordem diferente.

### 2.1.2.1 Cozimento

O cozimento consiste em submeter os cavacos a uma ação química do licor branco forte (soda cáustica mais sulfeto de sódio) e do vapor no digestor a fim de dissociar a lignina existente entre a fibra e a madeira. As fibras liberadas consistem na celulose industrial.

O digestor é um vaso de pressão, onde os cavacos e licor branco forte são introduzidos continuamente pela parte superior. A alimentação de cavaco para o digestor é através do separador de topo que consiste de uma rosca que movimenta os cavacos no sentido ascendente dentro de uma peneira cilíndrica envolvendo a rosca, que por sua vez está circundada pela carcaça do digestor.

O digestor possui quase todo seu volume (em torno de 90%) preenchido com licor e cavacos. O tempo de retenção do cavaco no digestor é determinado pela extração da polpa, sendo este tempo uma das variáveis a serem monitoradas.

### 2.1.2.2 Lavagem

Operações de lavagem eficientes servem para reduzir o residual de licor preto na massa, diminuindo o consumo de reagentes necessários às etapas posteriores de deslignificação e de branqueamento. A eficiência das operações de lavagem dependerá bastante do desempenho do equipamento utilizado, da consistência da polpa digerida e da quantidade de água utilizada.

O processo de lavagem tem início no centro do digestor até a parte inferior, onde se realiza uma operação de lavagem, a fim de se retirar a solução residual de licor preto fraco (licor branco forte usado no cozimento mais lignina dissociada da madeira). O processo de lavagem continua após a saída do digestor, onde a mistura de polpa (fibras) mais licor preto sofre separação por intermédio das etapas posteriores de lavagem, com encaminhamento deste último ao processo de recuperação de reagentes e energia. Os equipamentos de lavagem podem ser do tipo tambor, prensa, difusores ou de outras variedades.

### 2.1.2.3 Depuração

A depuração consiste na separação das impurezas da madeira e dos pedaços de cavaco que não foram devidamente cozidos no digestor, tais como nós e outros materiais como areia e pedras. Os rejeitos da depuração, dependendo da sua natureza, são removidos do processo ou retornam para serem reprocessados. É papel da depuração também remover o restante do licor preto da massa, deixando a massa sem os produtos químicos do cozimento e já sem a lignina dissolvida, ou seja, deixa na massa apenas os produtos que só o branqueamento consegue remover.

### 2.1.2.4 Deslignificação

O alto teor de lignina é um problema potencial, não só em termos de maior necessidade de reagentes alvejantes, mas também devido ao seu maior potencial de geração de impactos ambientais, resultantes da utilização desses reagentes.

A deslignificação com oxigênio é uma tecnologia bem estabelecida, tendo como finalidade a remoção de uma porção da lignina residual e a elevação da alvura da polpa marrom. Além disso, é uma etapa importante na retirada de extrativos, principalmente daqueles que sofrem reações de saponificação em meio alcalino.

### 2.1.2.5 Branqueamento

A principal função do branqueamento é remover as impurezas que dão cor à celulose. O branqueamento pode ser definido como um tratamento físico-químico que tem por objetivo melhorar as propriedades da pasta celulósica. Nesta etapa são removidos derivados de lignina, ainda remanescentes na pasta, além disso, ocorrem também reações que modificam quimicamente as substâncias coloridas, descorando-as.

O branqueamento é usualmente realizado em vários estágios ácidos ou então em meio alcalino. No processo convencional, usualmente tem-se empregado compostos de cloro, como o Dióxido de Cloro e Hipoclorito para impregnar a massa

e oxidar qualquer residual de lignina que ainda persistir após o cozimento e a deslignificação.

#### 2.1.2.6 Planta Química

A Planta Química produz os químicos necessários para processo como o dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) e o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) que serão utilizados na etapa de branqueamento da celulose.

#### 2.1.3 Secagem

A secagem compreende os processos de depuração da pasta branqueada, formação da folha, secagem e enfardamento da celulose. A função da depuração é remover as impurezas que possam ter sido transportadas juntamente com a pasta branqueada. Depois de depurada a pasta seguirá para a máquina, onde ocorrerá a formação e posterior secagem da folha. Depois de secas as folhas de celulose são então cortadas e agrupadas em fardos.

### 2.2 BOMBAS CENTRÍFUGAS

As fábricas de Celulose e Papel convivem com grande número de intervenções e elevado custo de manutenção em bombas centrífugas, principalmente devido à agressividade inerente ao processo de produção, manutenção de baixa qualidade, erro na instalação e operação inadequada.

#### 2.2.1 Definição de Bombas Centrífugas

Bombas são máquinas destinadas à transferência de líquidos de um ponto para outro. Para realizar essa movimentação, as bombas cedem energia ao líquido sob a forma de pressão e de velocidade, sendo a forma de pressão a predominante.

As bombas centrífugas são assim chamadas, porque o princípio de funcionamento destes equipamentos é por centrifugação dos fluidos. Para realizar o

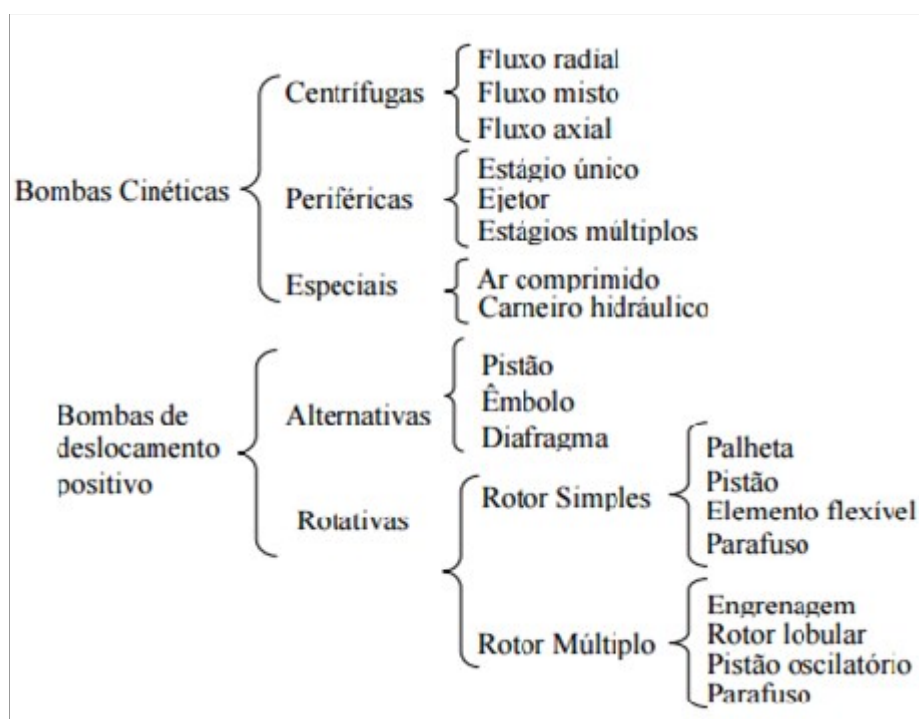


trabalho, as bombas centrífugas usam os seus dois principais componentes, que são o rotor (impelidor) e a carcaça.

As bombas são classificadas em dois grandes grupos de acordo com a forma como a energia é fornecida ao fluido, conforme figura 03:

- a) Bombas Cinéticas;
- b) Bombas Volumétricas ou Deslocamento Positivo;

Figura 03 - Classificação geral das bombas



Fonte: Mattos e Falco (1998)

Entre todas essas, as bombas centrífugas compõem a grande maioria, por sua simplicidade e características de operarem com vazões elevadas, pressões moderadas e fluxo contínuo.

### 2.2.2 Bombas Centrífugas de Média Consistência

As bombas centrífugas de média consistência (BMC) são usadas para aplicações em polpa de celulose de consistência média até 18%. A BMC é um tipo de centrífuga que utiliza rotor aberto e uma extensão axial (fluidizador) em direção a sucção. Esta extensão tem por finalidade aumentar a turbulência para fluidizar a

pasta. A BMC é aplicada com uma bomba de vácuo interna para remoção de ar e gases, conforme figura 04:

Figura 04 – Instalação de uma BMC e bomba de vácuo



Fonte: <https://www.sulzer.com/PT-br/brazil/> (2019)

### 2.2.3 Funcionamento das Bombas Centrífugas

Os principais componentes que constituem uma bomba centrífuga são conforme figura 05:

Figura 05 – Principais componentes de bomba centrífuga



<https://www.andritz.com/group-en> (2019)

- Rotor (Impelidor), responsável por impulsionar o fluido;

- Voluta (carcaça), Componente fixo que envolve o rotor e dispõe de bocais de entrada (sucção) e saída (descarga) do fluido;
- Eixo, fica conectado ao rotor e fornece movimento rotativo;
- Mancal, tem a função de sustentar o eixo de acionamento;
- Selo mecânico, faz a vedação do conjunto.

As bombas centrífugas na maioria das vezes são acionadas por um motor elétrico ou em alguns casos por motores estacionários a diesel. O eixo da bomba acopla com o eixo do motor que faz com que o rotor gire.

O giro do rotor cria duas zonas de pressão, sendo uma de baixa pressão na sucção e outra de alta pressão na descarga (recalque). A pressão agora maior do que a pressão na tubulação de sucção, “empurra” o fluido para dentro da bomba. O fluido agora dentro da bomba é forçado a sair pela ação da força centrífuga imposta pelo giro do rotor.

#### 2.2.4 Instalação, Operação e Manutenção de Bombas Centrífugas

Para que a bomba centrífuga atinja a máxima confiabilidade e vida útil depende do cumprimento dos procedimentos de instalação, operação e manutenção.

##### 2.2.4.1 Instalação

Falhas cometidas nessa fase ocasionam problemas futuros de operação, desgastes prematuros e danos irreparáveis. Pode-se dividir essa fase em quatro etapas:

- Base civil;
- Nivelamento/grauteamento;
- Conexão com os flanges;
- Alinhamento.

A base de fundação civil deve ser corretamente dimensionada para que o equipamento funcione sem vibração.

O grauteamento é a operação de colocar uma massa adequada entre a base de concreto e a base metálica da bomba, fazendo uma união efetiva entre elas, com

o objetivo de aumentar a rigidez da base e a massa do conjunto. Assim, as forças que atuam na bomba terão seus efeitos atenuados, sejam estas forças de tensão da tubulação nos flanges da bomba, sejam de desbalanceamento. Uma bomba bem grauteada vibrará muito menos do que outra submetida aos mesmos esforços com graute inadequado. A figura 06 apresenta a forma correta de instalação:

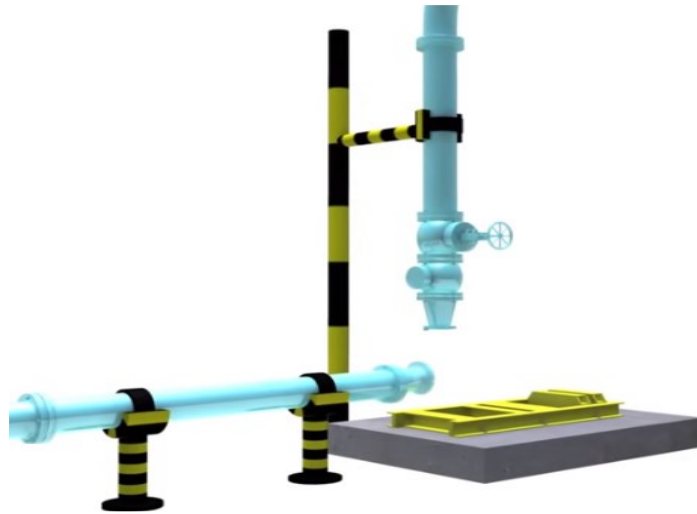
Figura 06 - Base de fundação



<https://equipe-bombas.com.br/wp-content/uploads/2018/08/MB-16-00.pdf> (2019)

A conexão das tubulações à bomba deve ser executada sem que se produzam tensões, ou seja, os tubos devem ser instalados e apoiados para que as forças, vibração e o peso da tubulação não sejam direcionados para a bomba, conforme ilustrado na figura 07. No caso de fluido muito quente também é necessário considerar as influências na tubulação por dilatação térmica.

Figura 07 - Tubulação suportada



Fonte: Heinz P. Bloch (2010)

Os desalinhamentos na tubulação podem ocorrer basicamente forma radial e angular. Os flanges da tubulação devem ser conectados ao da bomba totalmente livres de tensões, ou seja, as bombas não devem servir de apoio para a tubulação e com isso evita-se a transmissão de esforços para a carcaça.

#### 2.2.4.2 Operação

Se observados os procedimentos recomendados para instalação e operação, a bomba deve operar satisfatoriamente. Na partida da bomba é necessário observar as seguintes condições:

- Conferir todos os itens de fixação da bomba, motor e tubulações;
- Conferir as ligações elétricas, certificando-se de que todos os sistemas de proteção do motor encontram-se devidamente ajustados e funcionando;
- Verificar o sentido de rotação do acionador com a bomba desacoplada (para evitar operação a seco ou soltar o acoplamento rosqueado);
- Certificar-se manualmente de que o conjunto girante roda livremente;
- Certificar-se de que o alinhamento do acoplamento foi executado conforme as instruções do manual de serviço;
- Montar o protetor de acoplamento (NR-12), certificando-se de que o mesmo não está em contato com as partes girantes;

- Escorvar a bomba, isto é, encher a bomba e a tubulação de sucção com água ou com líquido a ser bombeado, eliminando-se simultaneamente o ar dos interiores.

Providências após partida:

- Ajustar a bomba para o ponto de operação (pressão e vazão), abrindo-se lentamente a válvula de recalque;
- Controlar a corrente consumida pelo motor elétrico. O valor da corrente nominal encontra-se na plaqueta do motor;
- Certificar-se de que a bomba opera livre de vibrações e ruídos anormais;
- Controlar a temperatura do mancal;

#### 2.2.4.3 Manutenção

É importante conhecer o funcionamento de um equipamento para que possamos realizar manutenção adequada. Esse conhecimento facilita a identificação de falhas e o modo de saná-las.

Para manter os equipamentos com maior disponibilidade para operação, são recomendados os seguintes métodos de manutenção: Manutenção Preditiva, Manutenção Preventiva e Manutenção Corretiva.

Manutenção Preditiva é aquela que controla o estado de funcionamento das máquinas em operação, através de instrumentos de medição, para prever falhas ou detectar alterações nas condições físicas que requeiram a manutenção. Esse método de manutenção utiliza ferramentas de medição de vibração, podendo identificar defeitos como:

- Desbalanceamento do rotor;
- Desalinhamento de acoplamento ou mancal;
- Empeno do eixo;
- Rolamentos danificados;
- Peças frouxas.

Manutenção Preventiva é aquela que concentra todo o esforço para evitar que um equipamento sofra uma parada imprevista, que poderia acarretar em perda

de produção e alto custo de manutenção. Esse método de manutenção tem como objetivo:

- Estabelecer frequência ideal de revisão da bomba;
- Determinar a troca de algum componente específico, quando necessário;
- Providenciar a disponibilidade de peças sobressalentes.

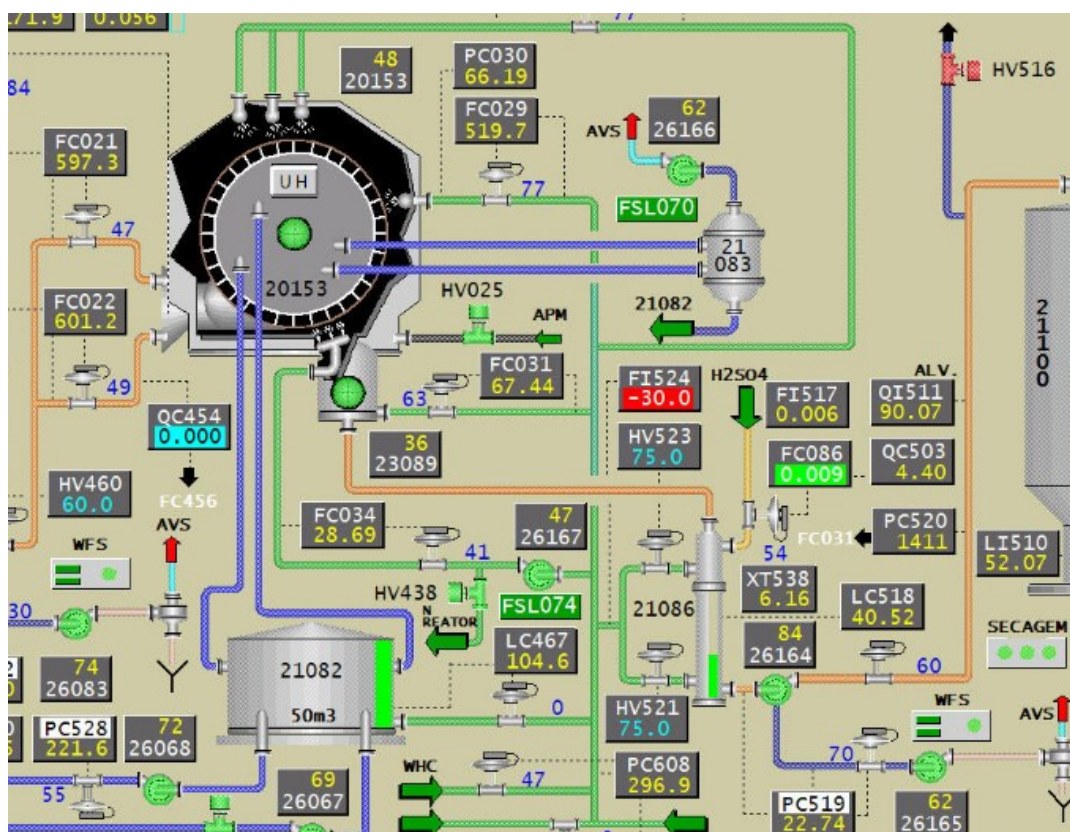
Manutenção Corretiva é aquela que se corrigem os defeitos e falhas já ocorridos, podendo ser realizada em caráter de emergência ou não. Esse método de manutenção tem como objetivo:

- Alterar as características hidráulicas (baixo rendimento), que prejudicam o sistema de bombeamento;
- Eliminar altas temperaturas nos mancais;
- Eliminar ruídos excessivos;
- Corrigir corrente do motor elevada;
- Eliminar vibrações excessivas;

#### 2.2.5 Aplicação da BMC no Processo

O fluxo na etapa do branqueamento está ilustrado na figura 08, onde a polpa branqueada passa pela rosca 23-xxxx-089 do DD Washer 20-xxxx-153, e na sequência alimenta o stand-pipe 21-xxxx-086 da BMC 26-xxxx-164 que alimenta a torre de massa branca 21-xxxx-100.

Figura 08 – Fluxo do processo onde está instalada a BMC



Fonte: Fábrica celulose (2018)

Essa BMC é extremamente importante para o processo do branqueamento e quando ocorre falha da mesma, tem-se como consequência perda de produção.

## 2.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordados os principais conceitos referentes as áreas do processo de produção de Celulose e as bombas centrífugas de média consistência aplicadas na área do branqueamento de polpa de celulose.

Este capítulo foi estruturado para fornecer conhecimento relacionados as etapas do processo de produção de celulose através do processo químico (Kraft) que consiste nas etapas de produção de cavaco, linha de fibras (cozimento, lavagem, depuração, deslignificação e branqueamento) e secagem.

Foi abordado também sobre a importância do cumprimento dos procedimentos de instalação, operação e manutenção para que a BMC atinja a máxima confiabilidade.



No próximo capítulo são abordados os conceitos da confiabilidade, modelos probabilísticos, FTA.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

A Engenharia da Confiabilidade tem uma função importante na manutenção industrial, visto que, utiliza de técnicas oriundas da probabilidade e estatística para melhorar a confiabilidade, a disponibilidade, aumentar o ciclo de vida dos ativos e estabelecer planos de manutenção que otimizem os custos de manutenção.

#### 3.1 CONFIABILIDADE

Segundo a ABNT NBR 5462 (1994), confiabilidade é: “Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”.

Segundo Elsayed (1996), “a confiabilidade de um equipamento pode ser definida como a probabilidade que desempenhe sua função durante um período estabelecido, sob determinadas condições de uso”.

Segundo Birolini (2007), “ confiabilidade é uma característica de um item, expressa pela probabilidade de que o item irá executar a sua função, nas condições dadas para um intervalo de tempo indicado”.

#### 3.2 MANTENABILIDADE

Segundo a ABNT NBR 5462 (1994), manutenibilidade é: “Capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos”.

#### 3.3 DISPONIBILIDADE

Segundo a ABNT NBR 5462 (1994), disponibilidade é: “Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados”.

### 3.4 FALHA

Segundo a ABNT NBR 5462 (1994), falha é: “Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”.

Segundo Pinto e Xavier (2005), falha pode ser entendida como a cessação da função de um item ou incapacidade de satisfazer a um padrão de desempenho previsto.

As falhas podem surgir por várias razões como:

- Erro de projeto;
- Falha na fabricação ou construção inadequada;
- Falha na instalação;
- Operação inadequada;
- Manutenção inadequada;
- Falha de material;
- Envelhecimento;
- Desgaste ou corrosão.

### 3.5 MODELOS PROBABILÍSTICOS

Para modelar o comportamento das funções de confiabilidade, aplica-se basicamente dois modelos para uma variável estatística: A função de densidade de probabilidade (pdf) e a função distribuição acumulada (cdf), onde a pdf e a cdf fazem a distribuição das probabilidades de uma variável aleatória.

Segundo Pallerosi (2007) as principais distribuições estatísticas para análise de confiabilidade são: Normal, Log-normal, Weibull e Exponencial.

#### 3.5.1 Distribuição Normal

Segundo Andruski (2018), diz-se que uma variável aleatória contínua  $t$  tem distribuição normal, com parâmetros  $\mu$  e  $\sigma^2$ , o que se denota por  $t \sim N(\mu, \sigma^2)$ , quando a função densidade de probabilidade (pdf) de  $t$  é dada por:

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

Onde:

$\mu$  = média dos tempos de falha

$\sigma$  = desvio padrão para os tempos de falha

A função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2)$$

A função distribuição acumulada (cdf) é dada por:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (3)$$

### 3.5.2 Distribuição Log-normal

Para Carter (1986), esta distribuição é a que melhor define o comportamento de equipamentos mecânicos sobre a ação da fadiga.

A função densidade de probabilidade (pdf) é expressa por:

$$f(t') = \frac{1}{\sigma'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t'-\mu'}{\sigma'}\right)^2} \quad (4)$$

Onde:

$t' = \ln(t)$ , no qual  $t$  são os tempos para falha

$\mu'$  = média dos logaritmos naturais dos tempos para falha

$\sigma'$  = desvio padrão para logaritmos naturais dos tempos para falha

A função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = \int_{\ln(t)}^{\infty} \frac{1}{\sigma'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu'}{\sigma'}\right)^2} dx \quad (5)$$

A função distribuição acumulada (cdf) é dada por:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \int_{\ln(t)}^{\infty} \frac{1}{\sigma'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu'}{\sigma'}\right)^2} dx \quad (6)$$

### 3.5.3 Distribuição Weibull

De acordo com Montgomery e Runger (2016), a distribuição de Weibull é frequentemente usada para modelar o tempo até a falha de muitos sistemas físicos diferentes. Os parâmetros na distribuição fornecem uma grade flexibilidade para modelar sistemas em que o número de falhas aumenta com o tempo, diminui com o tempo ou permanecem constantes com o tempo.

A função densidade de probabilidade (*pdf*) na distribuição Weibull de três parâmetros é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (7)$$

Onde:

$$f(t) \geq 0, t \geq 0 \text{ ou } \gamma; \beta > 0; \eta > 0; -\infty < \gamma < \infty$$

$\beta$  = parâmetro de forma

$\eta$  = parâmetro de escala, ou vida característica

$\gamma$  = parâmetro de posição ou deslocamento (ou vida livre de falhas)

A função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (8)$$

A função distribuição acumulada (*cdf*) é dada por:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (9)$$

### 3.5.4 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é uma das distribuições mais simples e sua função distribuição de probabilidade (*pdf*) é dada por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0, \lambda > 0 \quad (10)$$

Onde:

$\lambda$  = taxa constante, em falhas por unidade de medida (ex: falhas por hora)

$t$  = tempo de operação, vida, idade, em horas, ciclos, milhas, atuações, etc.

A função confiabilidade da distribuição exponencial de 1 parâmetro é dada por:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (11)$$

A função distribuição acumulada é dada por:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (12)$$

### 3.6 TAXA DE FALHA

De acordo com Reliasoft (2018), a função taxa de falhas nos dá o número de falhas por unidade de tempo. A taxa de falha é a chance do item falhar na próxima e menor unidade de tempo e dado que ele funcionou até então. Matematicamente a taxa de falha é dada por:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (13)$$

A taxa de falha é expressa em falhas por unidade de tempo, ciclos, distância, atuações, etc.

### 3.7 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

Segundo Mazzei (2018a), ao realizar a análise de dados de vida (também comumente referida como análise Weibull), o profissional tenta fazer previsões sobre a vida de todos os produtos na população ajustando uma distribuição estatística (modelo) para dados de vida a partir de uma amostra representativa das unidades. A distribuição parametrizada para o conjunto de dados pode então ser utilizada para estimar importantes características de vida do produto, tais como a confiabilidade ou a probabilidade de falha em um momento específico, a vida média e a taxa de falha. Análise de dados de vida exige que o profissional execute os seguintes passos:

- Reunir dados de vida do produto;

- Selecione uma distribuição de tempo de vida que irá ajustar os dados e modelar a vida útil do produto;
- Estime os parâmetros que irão ajustar a distribuição aos dados;
- Gerar gráficos e resultados que estimam as características de vida do produto, tais como a confiabilidade ou vida média.

### 3.8 DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE (RBD)

Segundo Mazzei (2018b) um Diagrama de Blocos de Confiabilidade é uma representação gráfica dos componentes ou subsistemas de um sistema e como eles estão logicamente conectados.

O Diagrama de Bloco de Confiabilidade (DBC), do inglês *Reliability Block Diagram* (RBD) é criado para ilustrar a disposição física de como os componentes são probabilisticamente arranjados para demonstrar a operação do sistema (Pallerosi, 2007). Os arranjos de confiabilidade podem ser classificados como:

- Série;
- Paralelo;
- Composto;
- Complexo.

Uma vez criado o RBD do sistema, este pode ser para determinar a Confiabilidade do sistema.

### 3.9 TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS (TMEF)

Segundo Santos (2012), o tempo médio entre falhas (TMEF – em inglês *Mean Time Between Failures*, MTBF) é o tempo esperado entre duas falhas sucessivas de um sistema. Portanto, o MTBF é uma métrica de confiabilidade importante para sistemas que podem ser reparados ou recuperados.

O MTBF calculado com o somatório de todos os tempos de operação dividido pelo número total de falhas do sistema.

$$MTBF = \frac{T_{total}}{n}$$

Onde:

$T_{total}$  = Tempo total trabalhado

n = Número de falhas

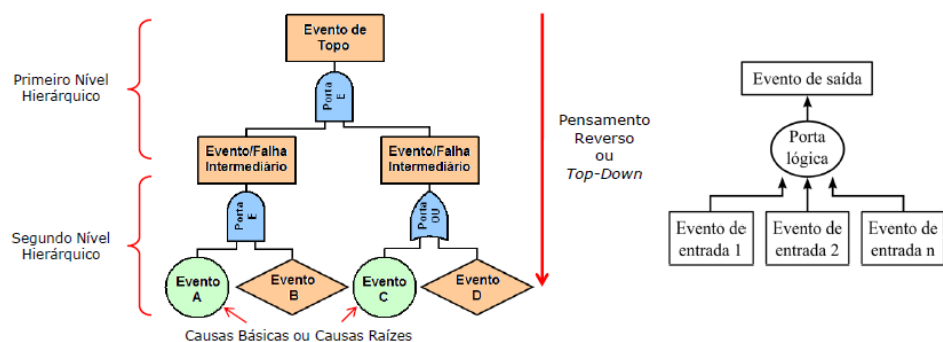
Segundo ENGETELES (2019) esse indicador consiste basicamente em medir o tempo médio entre uma falha e outra. A forma mais eficiente de administrar esse indicador é aplicá-lo a cada equipamento, dessa forma, as ações podem ser aplicadas de forma individual, facilitando as ações.

### 3.10 ANÁLISE POR ÁRVORE DE FALHA (FTA)

Segundo Rigoni (2018) a análise por árvore de falha (em inglês *Fault Tree Analysis* - FTA) é um método que consiste em um processo lógico e dedutivo que, partindo de um evento indesejado e pré-definido (Evento Topo), busca identificar as causas raízes da falha.

Ainda segundo Rigoni (2018) a FTA é uma técnica dedutiva de pensamento reverso que tem início pelo evento de topo. Essa técnica além de identificar as interações do sistema, também é acrescida de diagramas lógicos, operadores lógicos e símbolos, conforme figura 09. Os operadores podem ser do tipo “OU” ou do tipo “E”. O operador do tipo “OU” é utilizado, quando analisando o processo percebe-se que a ocorrência isolada de qualquer um dos eventos básicos resulta na ocorrência do evento de topo. O operador do tipo “E” por sua vez, é utilizado quando se percebe que a ocorrência do evento de topo é gerada pela ocorrência de um evento básico em juntamente com outro evento básico ou mais eventos.

Figura 09 – Exemplo de estrutura de FTA



Fonte: Rigoni (2018)



Segundo Benítez (2018) a análise por FTA fornece um quadro lógico para analisar as falhas de um sistema e essas informações podem ser utilizadas para tomada de decisões, avaliação de riscos e suporte à engenharia.

### 3.11 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordados os principais conceitos referentes a confiabilidade, disponibilidade, modelos probabilísticos (Distribuição Normal, Distribuição Log-normal, Distribuição Weibull, Distribuição Exponencial), taxa de falha, análise dos dados de vida, RBD, MTBF e FTA.

Este capítulo foi estruturado para fornecer conhecimento referente a confiabilidade, que é uma disciplina que aplica estatística para demonstrar se um sistema, equipamento, componente ou serviço desempenhará sua função durante o período de tempo requerido.

No próximo capítulo são abordados a aplicação da confiabilidade e os resultados alcançados.

#### 4 APLICAÇÃO DA CONFIABILIDADE E RESULTADOS

O foco desse trabalho foi direcionado para uma BMC do branqueamento de uma fábrica de produção de celulose, onde a mesma foi selecionada devido a sua criticidade para o processo.

Tomou-se o banco de dados de intervenções de manutenção através do sistema SAP para a higienização dos dados e posterior inserção no software. Foi construída uma planilha contendo os dados de intervenções de manutenção da BMC a ser estudada. O alcance do banco de dados compreende o período desde sua instalação em setembro/2007 até dezembro/2018. Foram filtradas as intervenções das disciplinas de manutenção relativas à indisponibilidade da BMC, sendo corretivas emergenciais e preventivas programadas.

Devido ao fato de estar trabalhando com informações de indisponibilidade, foi preciso realizar uma revisão e tratamento destes dados de falha e reparo. A planilha de modelagem (Quadro 01) foi utilizada para o tratamento destas informações prevenindo que possíveis inconsistências não afetassem os resultados da análise.

Esta planilha foi concebida internamente pelo engenheiro de confiabilidade corporativo e serviu como ferramenta para a execução de alguns projetos de confiabilidade. Através desta ferramenta de trabalho foi possível realizar a determinação dos MTBF.

Quadro 01 – Planilha padrão de modelagem

FÁBRICA:	C	Modelagem				DATA:	22/07/2019		
ÁREA:	Branqueamento	Dados de Falha				RESPONSÁVEL:	Fábio Lazzarine Peruchi		
EQUIPAMENTO:	Bomba de Média Consistência	Ordem	Texto breve	CenTrab respon.	Tipo de ordem	Componente de Falhou	Modo de Falha	MTBF	Dados da Falha
TAG:	26-3223-166								
50621724	Substituir kit completo					ACOPLAMENTO	VIBRAÇÃO		
46251211	Substituir kit completo	BOMBAS		PL01		ACOPLAMENTO	DESGASTE	888	F
49140581	APOIO- VERIFICAR VIBRAÇÃO DE BOMBA	TURNOMECC		LO01		ACOPLAMENTO	VIBRAÇÃO	777	F
141995231	REVISÃO ACOPLAMENTO BMC 164	BOMBAS		PL01		ACOPLAMENTO	ALINHAMENTO	462	S
142707241	SUBSTITUIR ELEMENTO ELÁSTICO	BOMBAS		PL01		ACOPLAMENTO	RESSECAMENTO	140	F
143764567	SUBSTITUIR ACOPLAMENTO AF-3222-0096	MEC DIG		PL01		ACOPLAMENTO	ROMPIMENTO	218	F
145534886	REVISAR ACOPLAMENTO E ALINHAR CONJUNTO	BOMBAS		PL01		ACOPLAMENTO	VIBRAÇÃO	327	S
50514287	Bba danificada .					MANCAL	QUEBRA		
50556942	Substituir kit completo					MANCAL	VIBRAÇÃO	289	S
50626576	Mancal danificado					MANCAL	RUIÍDO	587	F
45119387	Retirar BMC e trazer para oficina .	TURNOMECC		LO01		MANCAL	REVISÃO	502	F
46060972	Substituir retentor LA	BOMBAS		PL01		MANCAL	VAZAMENTO	302	F
47404486	Substituir Kit completo	BOMBAS		PL01		MANCAL	Sem Dados	414	S
47648538	Substituir kit completo	BOMBAS		PL01		MANCAL	VAZAMENTO	78	S
49143292	CORREIVA-BOMBA	TURNOMECC		LO01		MANCAL	SOLTURA	350	F
140447290	TROCAR MANCAL COM RUIDO	BOMBAS		PL01		MANCAL	RUIÍDO	153	F
143481420	SUBSTITUIR KIT COMPLETO	BOMBAS		PL01		MANCAL	Sem Dados	610	S
145495800	SUBSTITUIR MANCAL DA BOMBA	TURNOMECC		LO01		MANCAL	Sem Dados	377	S
147371856	SUBSTITUIR KIT COMPLETO	BOMBAS		PL01		MANCAL	DEFEITO	346	S
43829382	Retirar equipamento para envio do rotor	BOMBAS		PL01		ROTOR	Sem Dados		
44423046	Bomba com vibração anormal	BOMBAS		PL01		ROTOR	VIBRAÇÃO	196	F
46590686	Retirar equipamento para inspeção de rot	BOMBAS		PL01		ROTOR	ORDEM ENCERRADA	694	F
144155422	RETIRAR EQUIPAMENTO PARA INSPEÇÃO DO ROT	BOMBAS		PL01		ROTOR	INSPEÇÃO	1573	F

Fonte: Peruchi (2019)

Em posse destas informações apresentadas na planilha de modelagem desta BMC em estudo, realizou-se a exportação para o software Weibull, onde foi aplicada a Análise de Dados de Vida (LDA) para alguns dos componentes da BMC. Abaixo mostra-se como exemplo um dos componentes que passou por este estudo, conforme a figura 10.

Figura 10 – Planilha de dados inseridos no software Weibull

	Condição F ou S	Tempo até F ou S (dia)	IDs Subconjunto 1
1	F	289	
2	F	587	
3	F	502	
4	F	302	
5	F	414	
6	F	78	
7	F	350	
8	F	153	
9	F	610	
10	F	377	
11	S	346	
12			
13			
14			
15			

Configurações da Análise	
MLE	SRM
FM	MED

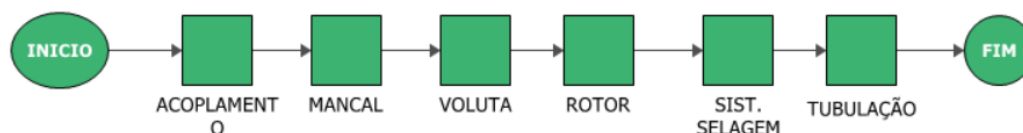
  

Resumo da Análise	
Parâmetros	
Beta	2,479823
Eta (dia)	424,900784
Outras	
Valor de LK	-65,774680
Falhas/Suspensões	
F/S	10/1
Comentários	

Fonte: Peruchi (2019)

A próxima etapa do trabalho foi construir um diagrama de blocos representativo da BMC, utilizando o software BlockSim da Reliasoft, para 06 componentes da BMC, conforme mostrado na figura 11. Os respectivos nomes de cada componente estão descritos no diagrama de blocos montado.

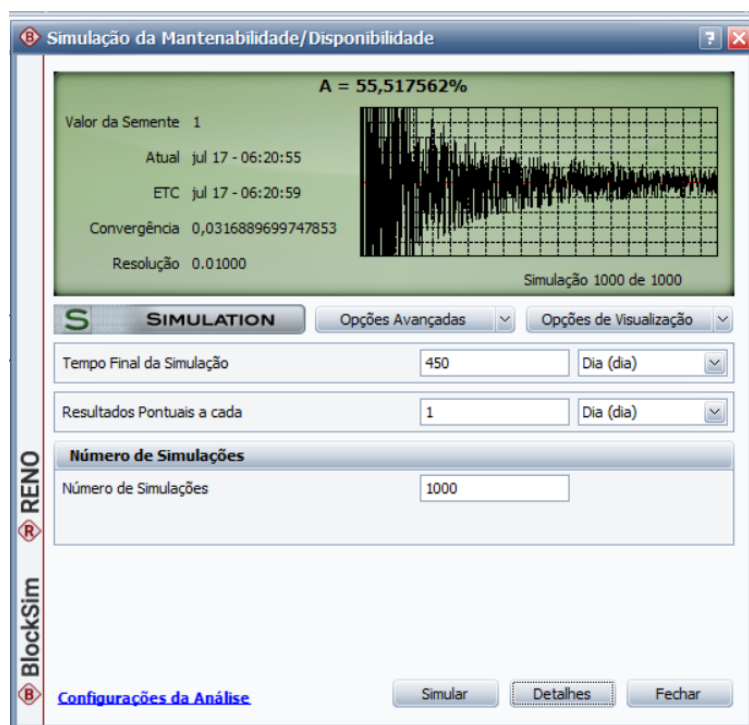
Figura 11 – Diagrama de blocos construído no software BlockSim



Fonte: Peruchi (2019)

Em seguida foi realizada a simulação do diagrama de blocos montado em série e contendo as informações de Weibull 02 parâmetros individuais para cada componente. Esta simulação está ilustrada na figura 12.

Figura 12 – Simulação do diagrama de blocos no BlockSim



Fonte: Peruchi (2019)

Foi considerado um tempo de análise de 450 dias equivalente a 15 meses de operação desta BMC.

Finalmente, tem-se o resultado da análise de manutenibilidade, confiabilidade e disponibilidade – Análise RAM de acordo com a figura 13. É importante a observação e análise dos seguintes resultados:

- Número esperado de falhas;
- Tempo indisponível do bloco;
- Quantidade e tempo indisponível por manutenção corretiva.

Legenda das Siglas exibidas na figura 13

- RS FCI – Índice da Reliasoft para de criticidade da falha;
- RS DECI – Índice da Reliasoft para de criticidade dos eventos que provocam indisponibilidade;
- RS DTCTI – *Reliasoft's Downtime Criticality Index* – Índice de criticidade de indisponibilidade.

Figura 13 – Resultado de manutenibilidade, confiabilidade e disponibilidade do diagrama de blocos no BlockSim

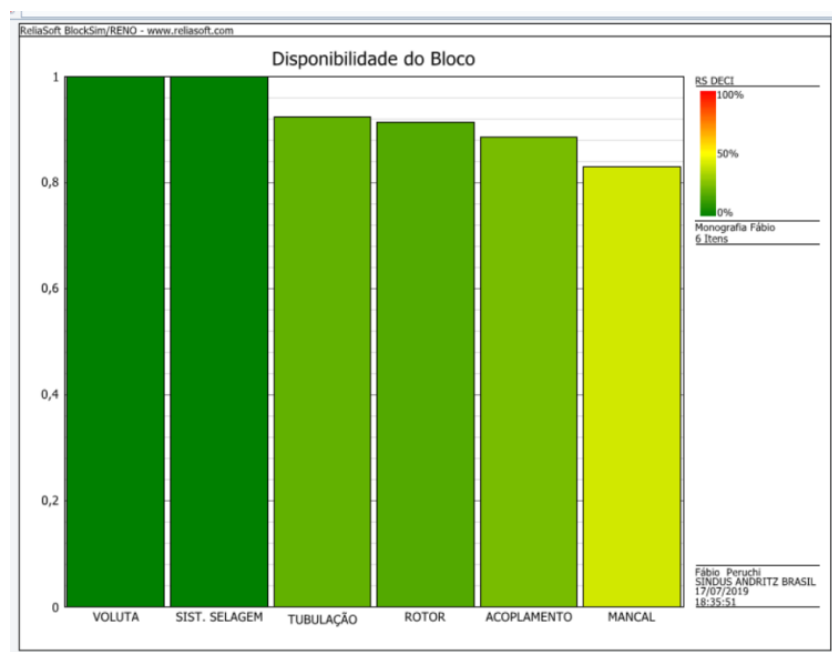
Nome do Bloco	RS FCI	RS DECI	RS DTICI	Disp. Média (Todos Eventos)	Disp. Média (sem MP, OC e IP)	# Esperado Falhas	# Esperado de Eventos OFF por Gatilho	Eventos de Parada do Sistema	Tempo Indisponível do Bloco (h)	Tempo Disponível do Bloco (h)	Quantidade de MCs
VOLUTA	0,00%	0,00%	0,00%	1	1	0	0	0	0	10800	0
SIST. SELAGEM	0,00%	0,00%	0,00%	1	1	0	0	0	0	10800	0
ACOPLAMENTO	23,61%	23,61%	25,65%	0,885884	0,885884	0,22	0	0,22	1232,457641	9567,542359	0
MANCAL	40,99%	40,99%	38,11%	0,830465	0,830465	0,382	0	0,382	1830,974624	8969,025376	0
ROTOR	16,20%	16,20%	19,31%	0,914098	0,914098	0,151	0	0,151	927,74611	9872,25389	0
TUBULAÇÃO	19,21%	19,21%	16,92%	0,924729	0,924729	0,179	0	0,179	812,924931	9987,075069	0

Fonte: Peruchi (2019)

Verificando o relatório gerado pela análise RAM e nos quesitos acima destacados é possível observar que o Mancal e o Acoplamento estão no topo da lista como componentes com maior contribuição para a indisponibilidade, maior número falhas esperadas e maior quantidade de manutenções corretivas. Após o resultado desse estudo, realizou-se uma nova delimitação de estudo que foi a escolha da análise dos componentes Mancal e Acoplamento do sistema da BMC.

No Gráfico 01 pode-se verificar visualmente que as disponibilidades dos blocos do mancal e do acoplamento são as menores, o que impacta diretamente na baixa disponibilidade da BMC.

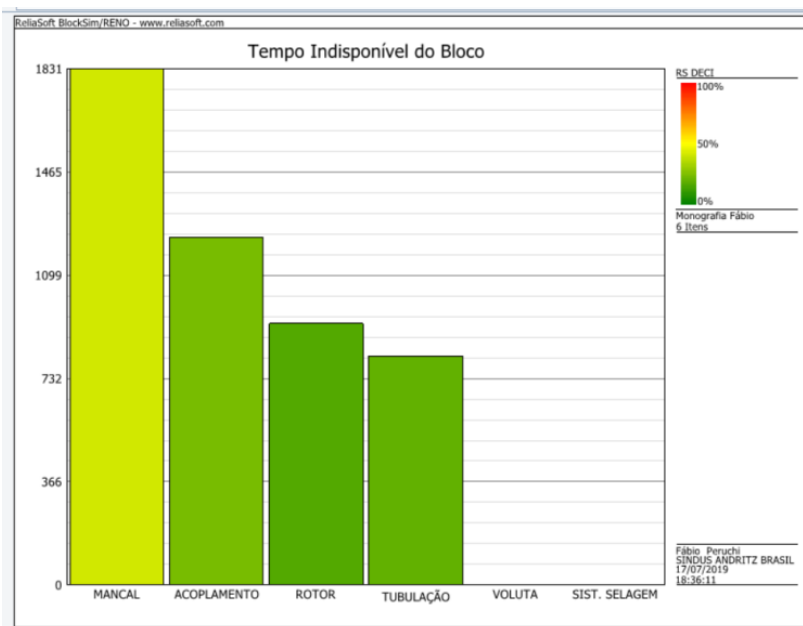
Gráfico 01 – Disponibilidade de cada bloco construído no BlockSim



Fonte: Peruchi (2019)

No Gráfico 02 pode-se verificar o tempo indisponível de cada bloco.

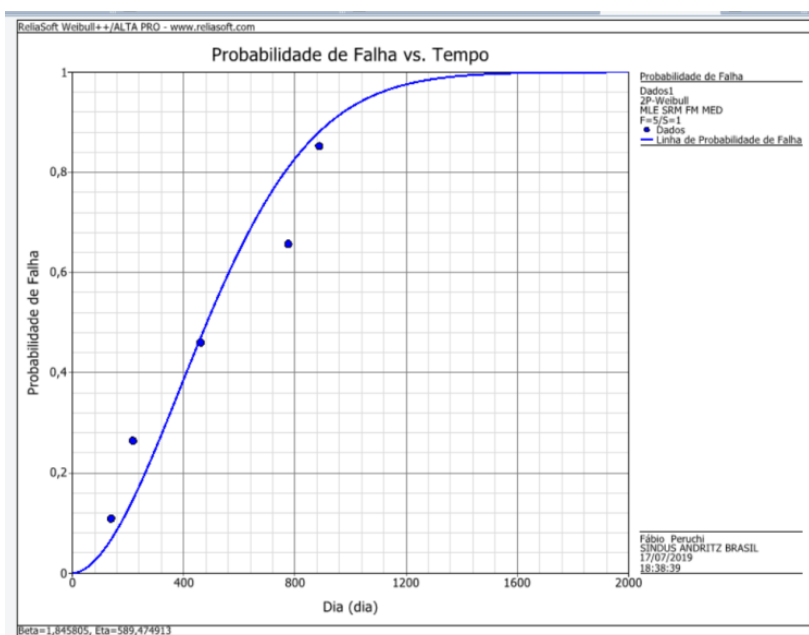
Gráfico 02 – Tempo indisponível de cada bloco construído no BlockSim



Fonte: Peruchi (2019)

A Figura 14 fornece a representação visual da função de probabilidade de falha  $F(t)$  do acoplamento que aumenta em função do tempo.

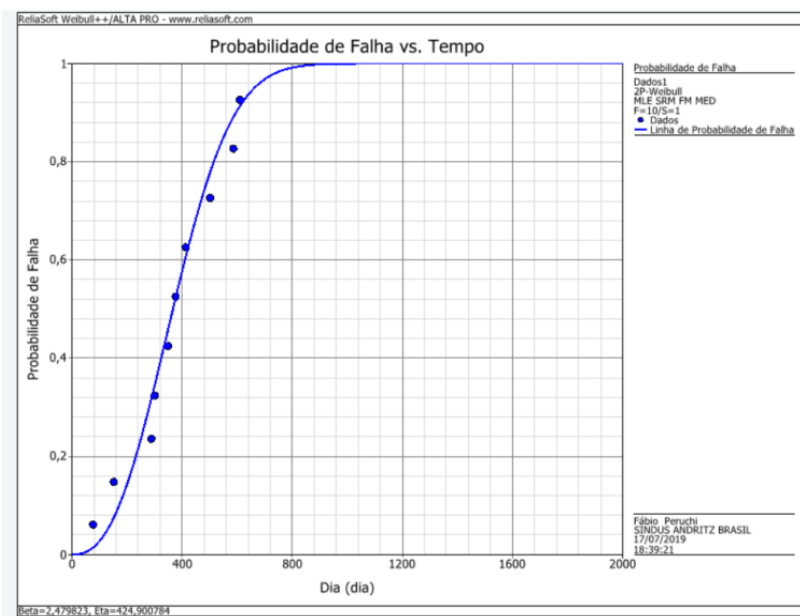
Figura 14 – Probabilidade de falha do acoplamento



Fonte: Peruchi (2019)

A Figura 15 fornece a representação visual da função de probabilidade de falha  $F(t)$  do mancal que aumenta em função do tempo.

Figura 15 – Probabilidade de falha do mancal

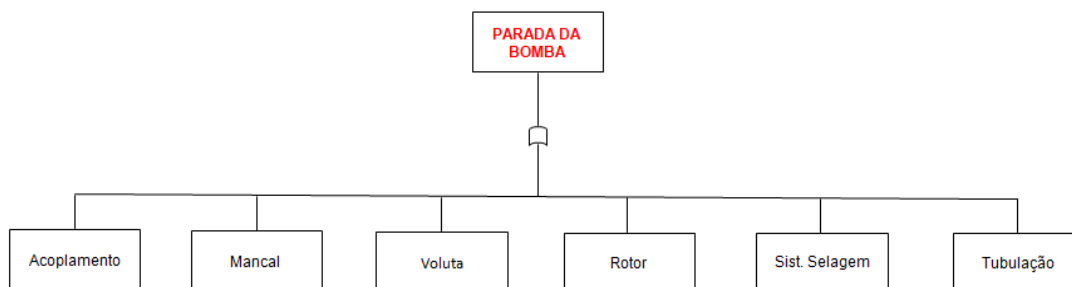


Fonte: Peruchi (2019)

Após análise dos resultados obtidos com o software Reliasoft do sistema dessa BMC, realizou-se uma nova delimitação de estudo que foi a análise das causas raízes, através de FTA.

O sistema dessa BMC foi composto por seis componentes: Acoplamento, Mancal, Voluta, Rotor, Sistema de Selagem e Tubulações. Esses componentes foram selecionados em função do banco de dados extraídos do SAP, conforme mencionado na planilha de modelagem. Esses componentes estão ilustrados no FTA geral, conforme figura 16.

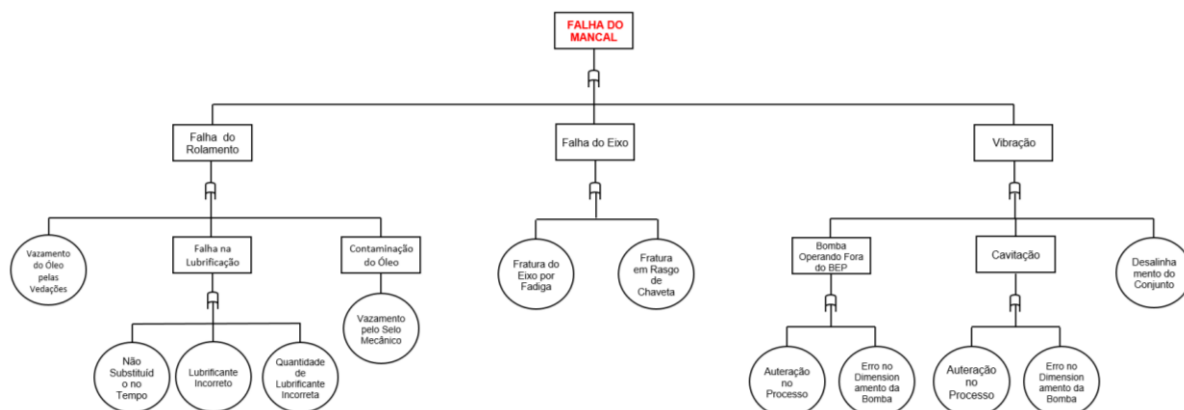
Figura 16 – Representação do FTA geral



Fonte: Peruchi (2019)

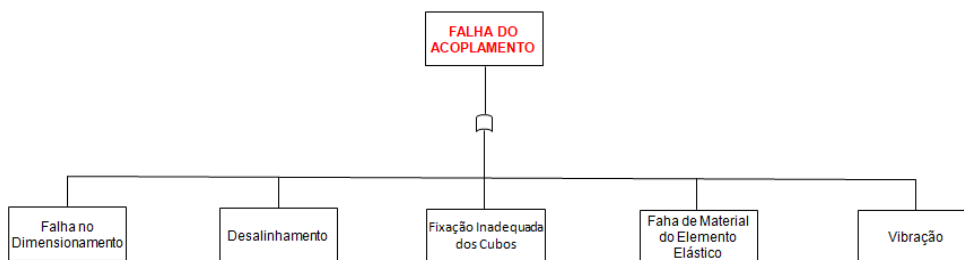
Como o Mancal e o Acoplamento foram os componentes com menor disponibilidade, foram elaborados FTA's apenas para os mesmos, conforme figuras 17 e 18 respectivamente.

Figura 17 – FTA do mancal



Fonte: Peruchi (2019)

Figura 18 – FTA do acoplamento



Fonte: Peruchi (2019)

O FTA foi elaborado para os componentes mais críticos da BMC para obtenção das causas raízes do evento em estudo. Com o resultado dos FTA's foi elaborado um plano de ação.

#### 4.1 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram aplicados os conceitos de confiabilidade direcionados para uma BMC do branqueamento de uma fábrica de produção de celulose.

Este estudo foi estruturado através de uma planilha contendo dados de indisponibilidade da BMC, onde em posse destas informações apresentadas na



planilha de modelagem, realizou-se a exportação para o software Weibull da ReliaSoft, onde foi aplicada a LDA para alguns dos componentes dessa bomba.

Na sequência do trabalho foi elaborado um diagrama de blocos representativo da BMC, utilizando o software BlockSim da Reliasoft, para 06 componentes da BMC. Em seguida foi realizada a simulação do diagrama de blocos através do Weibull dois parâmetros individuais para cada componente, onde foram gerados os resultados de manutenibilidade, confiabilidade e disponibilidade. Na sequência foi aplicada a ferramenta FTA para identificar as causas raízes dos dois componentes de maior impacto na disponibilidade e confiabilidade da BMC

No próximo capítulo está abordo o plano de ações para mitigar as causas raízes identificadas no FTA e como consequência aumentar a disponibilidade e confiabilidade dessa BMC.

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo contribuiu para destacar a importância da Engenharia da Confiabilidade para entender o ciclo de vida da BMC aplicada no branqueamento de celulose.

Este trabalho possibilitou estimar, por simulação, a disponibilidade de uma bomba centrífuga de média consistência aplicada no branqueamento de celulose, onde este processo consiste em remover as impurezas que dão cor à celulose, este estudo decorreu a partir de técnicas de análise de confiabilidade, utilizando-se do banco de dados do sistema SAP processados no software comercial da Reliasoft e finalizado com análise das causas raízes através de FTA para os dois componentes de maior impacto na disponibilidade do ativo.

O uso destas ferramentas possibilitou gerar um plano de ação (Tabela 01), cujo objetivo é mitigar os modos de falha dos componentes de menor confiabilidade. O plano de ação ainda não está totalmente implementado, onde se espera um aumento de disponibilidade de todos os componentes acima de 90%.

Desta forma, pode-se afirmar que o objetivo do trabalho ainda em análise.

Quadro 02 – Plano de ação

O quê fazer?	Porquê?	Onde?	Como?	Quem?	Quando?	Status
Instalar sistema de refrigeração e filtragem do óleo do mancal	Remover contaminantes do óleo e reduzir a temperatura para faixas normais de operação dos rolamentos	BMC 26-3223-164	Adquirir sistema de Refrigeração e <u>filtragem</u>	Fábio P.	31/12/19	Pendente
Reduzir diâmetro do rotor de 640 mm para 620 mm	Reduzir vibração <u>hidrodinâmica</u>	BMC 26-3223-164	Retirar rotor durante Parada Geral de 2019 e usinar	Fábio P.	30/03/19	Concluído
Criar plano preventivo para inspeção do rotor durante as Paradas Gerais	Garantir confiabilidade da BMC	BMC 26-3223-164	Incluir no Planejamento de PG	Marcio D.	30/03/19	Concluído
Elaborar estudo de viabilidade de troca do modelo do acoplamento de elemento elástico para tipo lamina	Garantir confiabilidade do conjunto	BMC 26-3223-164	Envolver fabricantes de acoplamentos para elaborar o estudo	Fábio P.	30/06/18	Pendente

Fonte: Peruchi (2019)

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho contribuirá para estudos futuros para bombas centrífugas. Aproveitando os conceitos aprendidos na utilização das ferramentas de confiabilidade apresentadas. Propõe-se utilizar o princípio do diagrama de blocos

(BlockSim, da ReliaSoft) para mensurar quais componentes da bomba falham e identificar a frequência das falhas, associando os fatores confiabilidade e disponibilidade no processo de bombeamento.

Como etapa subsequente, aplicar a ferramenta FTA para identificação das causas raízes referentes aos modos de falhas levantados e propor um plano de ações utilizando a ferramenta 5W2H para mitigar as causas das falhas.

## REFERÊNCIAS

- ANDRITZ; **Products**. Disponível em <https://www.andritz.com/group-en> Acesso em: mai. 2019.
- ANDRUSKI, Inácio G. **Estatística - Notas de Aulas**, Curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade** - Rio de Janeiro, 1994.
- BENÍTEZ, César M. V. **FTA**, Departamento Acadêmico de Eletronica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- BIROLINI, Alessandro. **Reliability Engineering: Theory and practice**. 5. ed. New York: Industrial Press, 2007.
- BLOCH, Heinz P.; BUDRIS, Allan R. **Pump User's Handbook: Life Extension**, 4. ed. - The Fairmont Press, 2010.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 1996. Disponível em: <http://trabalho.gov.br/> - Acesso em: mar. 2019.
- CARTER, A. D. S. **Mechanical Reliability**, 2. Ed. London, England. Ed. Macmillan, 1986.
- ELSAYED, E. **System reliability engineering**. Reading, Massachusetts: Addison Wesley Longman, 1996.
- ENGETELES; **MTBF**. Disponível em <https://engeteles.com.br/o-que-e-mtbf/> Acesso em: out. 2019.
- LAFRAIA, João Ricardo B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade** - Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- MATTOS, Edson E.; FALCO, Reinaldo. **Bombas Industriais**, 2. ed. - Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- MAZZEI, Denis. **Análise de Dados de Vida**, Curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018a.
- MAZZEI, Denis. **Otimização da Confiabilidade de Sistemas**, Curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018b.
- MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**, 6. ed. - Rio de Janeiro, 2016.

PALLEROSI, Carlos A. **Principais aplicações, vantagens, desvantagens e limitações das atuais distribuições estatísticas em confiabilidade.** In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CONFIABILIDADE, 5. 2007.

PINTO, Alan. K. **Gestão estratégica e Confiabilidade** – Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

PINTO, A. K & XAVIER, J. N. **Manutenção: Função estratégica** - Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

RELIASOFT, **Análise dos dados de vida.** Disponível em: [www.reliawiki.org](http://www.reliawiki.org), Acesso em: jun. 2019

RIGONI, Emerson. **Métodos para Análise de Falhas**, Curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

SANTOS, Alexandre F. **Confiabilidade Aplicada a Tomada de Decisão para Compressores Herméticos e Semi-Herméticos de Refrigeração Comercial**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

SULZER PUMPS; **Bombas Centrífugas.** Disponível em [www.sulzer.com](http://www.sulzer.com) Acesso em: mar. 2019.

VALMET BRASIL; **Celulose.** Disponível em [www.valmet.com/pt/](http://www.valmet.com/pt/) Acesso em: mai. 2019.