

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

**MOACYR ANGELI JUNIOR**

**ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO COM BASE EM ANÁLISE DE  
CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE UMA LINHA DE  
ENFARDAMENTO DE CELULOSE**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2019**

**MOACYR ANGELI JUNIOR**

**ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO COM BASE EM ANÁLISE DE  
CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE UMA LINHA DE  
ENFARDAMENTO 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. Dr. Marcelo Rodrigues

**CURITIBA**

**2019**



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

# **ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO COM BASE EM ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE UMA LINHA DE ENFARDAMENTO DE CELULOSE**

por

**MOACYR ANGELI JUNIOR**

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. Marcelo Rodrigues Dr.  
Professor Orientador - UTFPR

---

Prof. Wanderson Stael Paris Msc.  
Membro Titular da Banca - UTFPR

---

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

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por me guiar na trajetória da minha vida me mostrando o caminho.

À minha esposa Viviani, por todo o suporte e compreensão durante a minha jornada de estudos.

Aos meus pais, por terem feito sempre o melhor possível para que eu pudesse me desenvolver.

## RESUMO

ANGELI, Moacyr Junior. **Estratégia de Manutenção com base em Análise de Confiabilidade dos Equipamentos de uma Linha de Enfardamento de Celulose.** 2019. 86. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

As linhas de embalagem de celulose, também conhecidas como linhas de enfardamento, são a última etapa no processo de fabricação de celulose. A celulose proveniente da máquina de secagem é cortada em folhas retangulares de dimensões previamente definidas e no enfardamento são empilhadas, compactadas, embaladas e amarradas para transporte. Compostas por uma série de equipamentos automatizados e com funções distintas, as linhas de enfardamento apresentam diversos modos de falha e ocorrências randômicas, resultando em elevado número de intervenções corretivas e elevação de custos de produção e manutenção. Neste trabalho são desenvolvidas análises de confiabilidade utilizando ferramentas como RBD, LDA e RAM visando determinar a melhor estratégia de manutenção para os equipamentos com base na confiabilidade de seus subsistemas e componentes. Com a realização do trabalho, verifica-se que os comportamentos de falha dos componentes e subsistemas dos equipamentos que apresentam maior contribuição na indisponibilidade das linhas estão relacionados a falhas na fase inicial de operação ou em pouco tempo após intervenções de manutenção. Dessa forma, foi necessário o aprofundamento das análises utilizando-se da ferramenta árvore de falhas (FTA) para identificar as causas básicas e propor as ações para prevenção das falhas.

**Palavras-chave:** Enfardamento. Análise de Confiabilidade. Análise RAM. Engenharia de Confiabilidade.

## ABSTRACT

ANGELI, Moacyr Junior. **Maintenance Strategy based on Equipment Reliability Analysis of a Pulp Bailing Line.** 2019. 86. Monography (Reliability Engineering Specialization) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

The bailing lines are the last stage in the cellulose production process. The cellulose coming from the dryer is cut in rectangular sheets of preset dimensions and in the bailing lines are stacked, compacted, packed and tied for transport. Composed by a series of automatized and function-distinct equipment, the bailing lines presents various and random failure modes, resulting in elevated amount of corrective maintenance and increased reestablishment and production costs. The objective of this work is to carry reliability analysis using tools like RBD, LDA and RAM aiming to determinate the best maintenance strategy for the equipment based on the reliability of its subsystems and components. With the accomplishment of the work, it is verified that the failure behaviors of the components and subsystems of the equipment that have the greatest contribution to the unavailability of the lines are related to failures in the initial phase of operation or shortly after maintenance interventions. Thus, it was necessary to deepen the analysis using the fault tree analysis tool (FTA) to identify the root causes and propose actions to prevent failures.

**Keywords:** Bailing Line. Reliability Analysis. RAM Analysis. Reliability Engineering.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Layout de linhas de enfardamento de celulose.....	15
Figura 1.2 – Protocolo de pesquisa.....	18
Figura 2.1 – Etapas do processo de produção de celulose branqueada.....	21
Figura 2.2 – Subáreas do processo de secagem e enfardamento.....	22
Figura 2.3 – Layout de depuração de massa branqueada.....	23
Figura 2.4 – Layout da mesa de formação.....	23
Figura 2.5 – Layout da seção de prensas.....	24
Figura 2.6 – Layout do secador e detalhe da caixa de sopragem.....	25
Figura 2.7 – Layout da cortadeira de celulose.....	26
Figura 2.8 – Layout do enfardamento de celulose.....	27
Figura 2.9 – Componentes dos transportadores de fardos.....	28
Figura 2.10 – Prensa de fardos de celulose.....	29
Figura 2.11 – Encapadeira de fardos.....	30
Figura 2.12 – Amarradeira de fardos.....	31
Figura 2.13 – Dobradeira.....	32
Figura 2.14 – Empilhador de Fardos.....	33
Figura 2.15 – Unitizadora de Fardos.....	34
Figura 3.1 – Representação lógica de um sistema.....	38
Figura 3.2 – Exemplo de sistema em série.....	39
Figura 3.3 – Exemplo de sistema em paralelo.....	39
Figura 3.4 – Exemplo de sistema misto.....	40
Figura 3.5 – Exemplo de sistema k de n.....	41
Figura 3.6 – Exemplo de sistema load sharing.....	42
Figura 3.7 – Simbologia básica FTA.....	43
Figura 4.1 – Planilha do banco de dados de intervenções.....	46
Figura 4.2 – Dados de vida inseridos no software Weibull++.....	46
Figura 4.3 – Modelagem da linha de enfardamento.....	47
Figura 4.4 – Modelagem dos equipamentos de enfardamento.....	48
Figura 4.5 – Simulação do diagrama de blocos do enfardamento.....	49
Figura 4.6 – Resultado da simulação de disponibilidade, manutenibilidade e confiabilidade da linha de enfardamento.....	50
Figura 4.7 – FTA falhas em cabos elétricos.....	52

Figura 4.8 – FTA falhas no cabo guia.....	54
Figura 4.9 – FTA falhas no conjunto de sensores.....	55
Figura 4.10 – FTA falhas no conjunto de bombas hidráulicas.....	57
Figura 4.11 – FTA falhas no conjunto de cilindros hidráulicos.....	58
Figura 4.12 – FTA falhas no conjunto de vedações da prensa.....	59
Figura 4.13 – FTA falhas no conjunto de tubulações da prensa.....	60
Figura 4.14 – FTA falhas na barreira de luz.....	61
Figura 4.15 – FTA falhas em cilindros pneumáticos.....	63
Figura 4.16 – FTA falhas do motor elétrico.....	64
Figura 4.17 – FTA falhas sistema de alimentação de capas.....	65
Figura 4.18 – FTA falhas sistema de dobra de capas.....	66
Figura 4.19 – FTA falhas no sistema de vácuo.....	68
Figura 4.20 – FTA Conjunto de sequência.....	69
Figura 4.21 – FTA Unidade de torção.....	70
Figura 4.22 – FTA Conjunto de cilindros hidráulicos.....	72
Figura 4.23 – FTA Mesa de Giro.....	73
Figura 4.24 – FTA Cabeçote de impressão.....	74
Figura 4.25 – FTA Alinhador de fardos.....	76
Figura 4.26 – FTA Transportador de fardos do empilhador.....	77
Figura 4.27 – FTA Cilindros hidráulicos da unitizadora.....	78
Figura 4.28 – FTA Unidade de torção.....	80
Figura 4.29 – Simulação de confiabilidade, disponibilidade e manutenabilidade.....	82
Gráfico 4.1 – Curva de confiabilidade pontual da linha de enfardamento.....	47
Gráfico 4.2 – Taxa de falhas do cabeamento elétrico.....	51
Gráfico 4.3 – Taxa de falhas do cabo guia.....	53
Gráfico 4.4 – Taxa de falhas do conjunto de sensores.....	55
Gráfico 4.5 – Taxa de falhas do conjunto de bombas hidráulicas.....	56
Gráfico 4.6 – Taxa de falhas do conjunto de cilindros hidráulicos.....	57
Gráfico 4.7 – Taxa de falhas do conjunto de vedações.....	59
Gráfico 4.8 – Taxa de falhas do conjunto de tubulações.....	60
Gráfico 4.9 – Taxa de falhas da barreira de luz.....	61
Gráfico 4.10 – Taxa de falha dos cilindros pneumáticos.....	62



Gráfico 4.11 – Taxa de falhas do motor elétrico.....	63
Gráfico 4.12 – Taxa de falhas do sistema de alimentação de capas.....	65
Gráfico 4.13 – Taxa de falhas do sistema de dobra de capas.....	66
Gráfico 4.14 – Taxa de falhas do sistema de vácuo.....	67
Gráfico 4.15 – Taxa de falhas do conjunto de sequência.....	69
Gráfico 4.16 – Taxa de falhas da unidade de torção.....	70
Gráfico 4.17 – Taxa de falhas do conjunto de cilindros hidráulicos.....	71
Gráfico 4.18 – Taxa de falhas da mesa de giro.....	72
Gráfico 4.19 – Taxa de falhas do cabeçote de impressão.....	74
Gráfico 4.20 – Taxa de falhas do alinhador de fardos.....	75
Gráfico 4.21 – Taxa de falhas do transportador do empilhador.....	76
Gráfico 4.22 – Taxa de falhas dos cilindros hidráulicos.....	78
Gráfico 4.23 – Taxa de falhas da unidade de torção.....	79
Gráfico 4.24 – Taxa de falhas da unidade de torção.....	83
Quadro 4.1 – Estratégia de manutenção com base nas análises.....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

FTA – *Fault Tree Analysis* – Análise por Árvore de Falhas

LDA – *Life Data Analysis* – Análise de Dados de Vida

MTBF – *Mean Time Between Failures* - Tempo médio entre falhas

MTTF – *Mean Time To Failure* - Tempo médio até a falha

RAM - *Reliability, Availability, Maintainability Analysis* – Análise de Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade

TTF - *Time To Failure* – Tempo até a Falha

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\beta$  – Fator de forma da curva, distribuição Weibull

$\gamma$  – Parâmetro de forma, distribuição Weibull

$\lambda$  – Taxa de falhas

$e$  – Função exponencial

$t$  – Tempo

$R(t)$  – Função confiabilidade no tempo  $t$

$F(t)$  – Função densidade de probabilidade de falhas no tempo  $t$

$\mu$  - Desvio padrão da distribuição normal

$\Gamma$  – Função gama

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</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 .....	17
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.4.1	Protocolo de Pesquisa.....	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2</b>	<b>O PROCESSO DE SECAGEM E ENFARDAMENTO DE CELULOSE .21</b>	
2.1	DEPURAÇÃO DE MASSA BRANQUEADA .....	22
2.2	MESA DE FORMAÇÃO.....	23
2.3	SEÇÃO DE PRENSAS.....	24
2.4	SECADOR.....	25
2.5	CORTADEIRA.....	25
2.6	ENFARDAMENTO .....	26
2.6.1	Transportadores .....	27
2.6.2	Equipamentos de Processo.....	28
2.6.2.1	Prensa de Fardos.....	28
2.6.2.2	Encapadeira .....	29
2.6.2.3	Amarradeira de Fardos.....	30
2.6.2.4	Dobradeira de Fardos.....	31
2.6.2.5	Empilhador de Fardos .....	32
2.6.2.6	Unitizadora .....	33
2.7	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	34
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>35</b>
3.1	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA).....	35
3.1.1	DISTRIBUIÇÃO WEIBULL .....	36
3.1.2	DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL.....	37
3.2	DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE (RBD) E ANÁLISE RAM .....	38
3.2.1	SISTEMA EM SÉRIE.....	39
3.2.2	SISTEMA EM PARALELO .....	39
3.2.3	SISTEMA MISTO .....	40
3.2.4	SISTEMA K DE N.....	41
3.2.5	SISTEMA LOAD SHARING.....	41
3.3	FTA ( <i>FAULT TREE ANALYSIS</i> ).....	42
3.3.1	Simbologia.....	43
3.4	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	44
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>45</b>

4.1	TRANSPORTADOR DE GIRO .....	50
4.2	TRANSPORTADOR DE TRANSLAÇÃO .....	52
4.3	PRENSA DE FARDOS .....	56
4.4	ENCAPADEIRA.....	62
4.5	AMARRADEIRA 1ª POSIÇÃO.....	68
4.6	DOBRADEIRA.....	71
4.7	IMPRESSORA DE LOGOMARCA .....	73
4.8	EMPILHADOR DE FARDOS.....	75
4.9	UNITIZADORA DE FARDOS .....	77
4.10	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE .....	80
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>84</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>86</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda a aplicação de análises de confiabilidade nos equipamentos de uma linha de enfardamento, sendo esta a etapa final do processo produtivo de celulose.

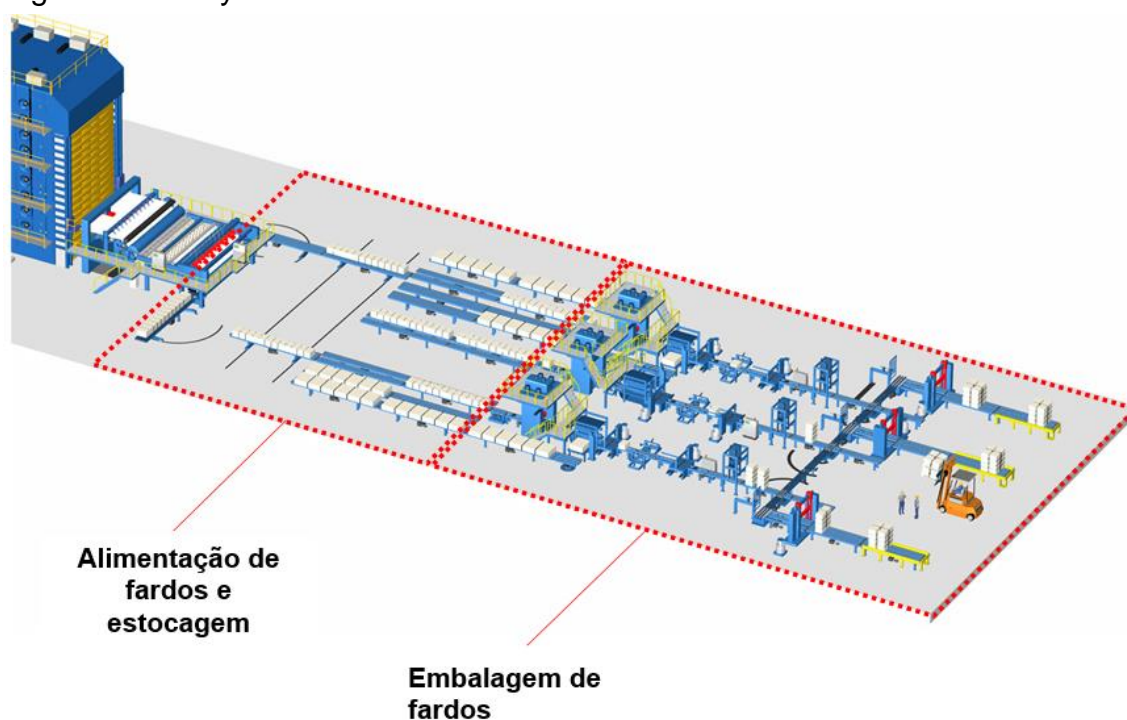
Após a formação da folha, secagem e corte, as mesmas são dispostas em pilhas contendo aproximadamente 250 Kg e encaminhadas aos equipamentos de enfardar, sendo este um processo totalmente automatizado. O primeiro equipamento do processo é a balança, onde o peso da pilha de folhas é aferido e é feito o último ajuste pelo operador, antes da aplicação da embalagem. Na sequência, esta entra na prensa hidráulica, onde tem seu volume reduzido para que ocupe menor espaço de armazenagem e adquira resistência visando possibilitar empilhamento. A seguir é aplicada a capa de proteção da celulose (feita também de celulose), a mesma é amarrada para fixação e o fardo é encaminhado à dobradeira, onde dobras são feitas em suas extremidades para que seja possível realizar a aplicação dos últimos arames e assim compor um fardo embalado. Estes por sua vez são empilhados em quatro fardos e posteriormente sofrem outra amarração, formando assim uma unidade. As unidades são transportadas ao armazém, onde são coletadas para carregamento nos navios.

Em resumo, os objetivos das linhas de enfardamento são:

- Controle de peso da celulose a ser comercializada;
- Diminuição de volume e controle dimensional dos fardos para armazenagem;
- Aplicar a embalagem do fardo para evitar contaminações do produto;
- Formação de unidades empilhadas para o transporte da celulose;
- Identificar as unidades com numeração adequada por meio de uma máquina marcadora.

A Figura 1.1 mostra o layout típico de linhas de enfardamento de celulose.

Figura 1.1 – Layout de linhas de enfardamento de celulose



Fonte: Manual do Enfardamento, (2001).

O layout de uma linha de enfardamento pode ser dividido basicamente em duas seções: alimentação e estocagem de fardos e a de embalagem dos fardos.

Os equipamentos que compõem estas linhas são dispostos quase que em sua totalidade em série, sendo que as falhas ocorridas nestes impactam diretamente na disponibilidade da linha e na produção real da planta.

### 1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

Dada importância dos equipamentos de enfardamento no processo produtivo, ocorre a necessidade de realização de trabalhos voltados à disponibilidade e confiabilidade dos ativos. Entender os modos de falha, quais equipamentos os apresentam com maior frequência, estabelecer análises de confiabilidade, realização de árvores de falhas (FTA's) e como resultado implementação de ações preventivas e/ou preditivas tornam-se premissas essenciais no desenvolvimento da melhor estratégia de manutenção da unidade.

Dessa forma, neste trabalho busca-se elaborar o diagrama de blocos de confiabilidade (RBD) de uma linha de enfardamento e de seus equipamentos e

subsistemas, de modo a explorar as oportunidades identificadas para melhoria dos resultados de disponibilidade e confiabilidade dos ativos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Elaborar uma estratégia de manutenção para uma linha de enfardamento de celulose com base em estudo de engenharia de confiabilidade dos equipamentos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Segue planejamento das etapas para atingir o objetivo geral:

- Seleção de uma linha de enfardamento para realização do estudo;
- Levantamento dos dados históricos de falhas nos equipamentos;
- Tratamento dos dados e inserção das seguintes informações: modo de falha, tipo de componente e sistema ao qual pertence.
- Modelagem dos equipamentos no sistema BlockSim da Reliasoft;
- Obtenção dos dados de confiabilidade utilizando o sistema Weibull++ da Reliasoft;
- Utilização das ferramentas LDA e RAM para determinação do(s) equipamento(s) de menor confiabilidade;
- Seleção dos equipamentos de menor confiabilidade para estudo específico, aplicando a ferramenta FTA;
- Elaboração de planos de ação visando mitigação e/ou eliminação das causas raízes por meio de adequação da estratégia de manutenção, ajustes na condição de operação ou realização de melhorias nos equipamentos.



### 1.3 JUSTIFICATIVA

A indústria de produção de celulose branqueada apresenta elevados volumes de produção, tendo expressiva participação nas exportações brasileiras. Nestas condições, a disponibilidade das linhas produtivas e a confiabilidade dos equipamentos tornam-se imperativas frente à um cenário de produção de tais patamares.

Dessa forma, objetivando atingir elevados índices de disponibilidade e eliminação das perdas produtivas, a aplicação de ferramentas de confiabilidade e obtenção de informações úteis para a tomada de decisão na manutenção tornam-se essenciais na busca constante por resultados, com metas cada vez mais desafiadoras.

Em Azevedo (2007) a confiabilidade trata da probabilidade de uma máquina em poder desempenhar suas funções de maneira adequada em circunstâncias específicas por determinado período de tempo. Por meio da aplicação de modelagens estatísticas, essa disciplina permite compreender o que acontece com a máquina quando ela trabalha em determinadas condições.

Portanto, o conhecimento dos padrões de funcionamento e de falha dos equipamentos e seus respectivos componentes tem papel determinante na estratégia adotada pela manutenção da área. O estudo foi tomado em uma empresa do ramo de celulose e papel, onde foi selecionada a linha com menor disponibilidade para ser trabalhada. Por se tratarem de linhas com alta similaridade construtiva, as ações uma vez implementadas e consolidadas nessa linha serão estendidas às demais.

### 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente capítulo aborda o detalhamento da metodologia utilizada no trabalho, utilizando o protocolo de pesquisa para apresentar as etapas seguidas para alcançar os objetivos propostos.

A pesquisa é de natureza aplicada, pois gera conhecimento específico relativo aos equipamentos da empresa.

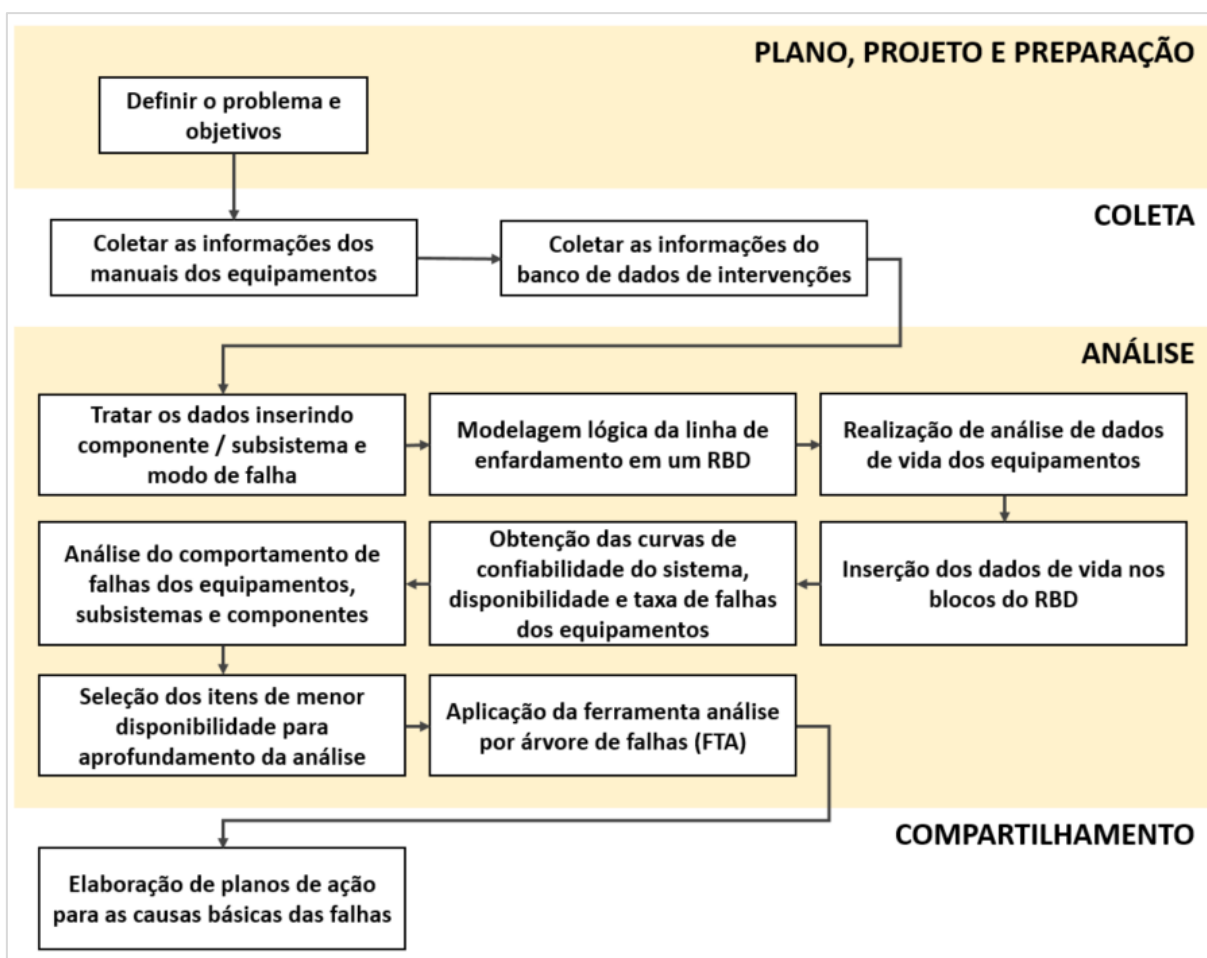
Os procedimentos de coleta de dados estão voltados à pesquisa de histórico de equipamentos, consultas a material técnico e pesquisas bibliográficas para sustentar os argumentos propostos.

A técnica de coleta de dados se dá por meio da análise do banco de dados de intervenções da empresa.

#### 1.4.1 Protocolo de Pesquisa

O protocolo de pesquisa do presente trabalho irá apresentar as etapas das atividades e as correlações entre essas, com objetivo de estabelecer um melhor entendimento na figura 1.2.

Figura 1.2 – Protocolo de pesquisa



Fonte: O Autor (2019).

A coleta de dados descreve como os dados serão obtidos, neste caso, será feito por meio da pesquisa em manuais dos equipamentos, pesquisa do banco de dados de intervenções dos equipamentos e entrevistas com os técnicos e supervisores de área.

A fase de análise foi dividida essencialmente em cinco etapas, sendo elas:

Etapa I, tratamento dos dados coletados, inserindo informações relevantes para a análise, como qual componente ou subsistema falhou, calcular o MTBF / MTTF e inserir o modo de falha, transformando dados em informações úteis para entrada no sistema.

Etapa II, modelagem lógica da linha de enfiamento no sistema utilizando a ferramenta diagrama de blocos de confiabilidade (RBD), obtenção dos dados de vida dos equipamentos, subsistemas e componentes e inserção nos respectivos diagramas de blocos para cálculo da confiabilidade e disponibilidade dos ativos.

Etapa III, onde é feita a análise do comportamento de falha dos equipamentos e seleção dos equipamentos de menor disponibilidade para aprofundamento.

Etapa IV, aplicação da ferramenta de análise por árvore de falhas (FTA), buscando identificar as causas básicas dos principais modos de falha dos componentes dos equipamentos.

A fase de compartilhamento consiste na elaboração de planos de ação visando eliminar ou mitigar as causas das falhas dos itens de menor disponibilidade. Esses por sua vez serão inseridos nas rotinas da manutenção da área.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 serão apresentados os detalhes e esquemas da linha de enfiamento, bem como um maior detalhamento dos equipamentos, sistemas e componentes.

Os conceitos de diagrama de blocos de confiabilidade, análise de dados de vida, análise RAM e FTA são apresentados no capítulo 3 para fundamentação do trabalho.

No capítulo 4 serão realizadas as aplicações dos conceitos expostos no capítulo 3 aos equipamentos da linha de enfiamento detalhados no capítulo 2, de modo a selecionar os itens de menor disponibilidade para o seguimento do trabalho.

Na sequência os itens serão submetidos a análise com a ferramenta FTA para determinação dos possíveis modos de falha e assim a elaboração dos planos de ação para mitigar / eliminar a ocorrência das falhas.

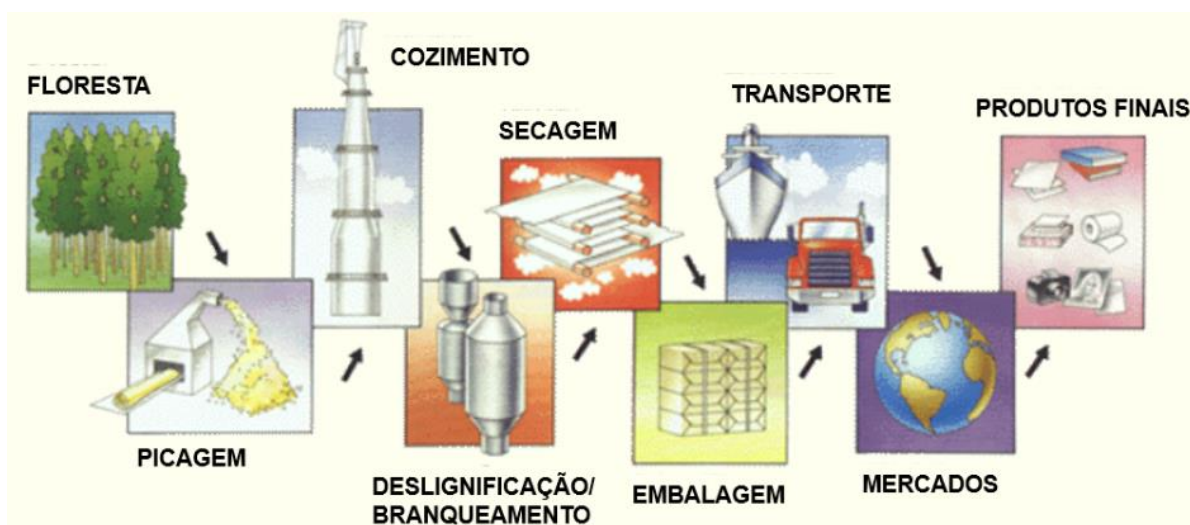
No capítulo 5 serão apresentados os resultados obtidos com a análise, os planos de ação e as estimativas de confiabilidade após a implementação.

## 2 O PROCESSO DE SECAGEM E ENFARDAMENTO DE CELULOSE

O processo de secagem e enfardamento é a última etapa do processo produtivo da celulose branqueada. Sua função básica é a remoção de água da polpa, que chega na secagem com cerca 3% de consistência e após sua passagem pelo processo atinge valores de 88 a 90% de consistência, permitindo seu adequado armazenamento e posterior transporte.

O entendimento da sequência do processo permite perceber a importância do indicador disponibilidade para a fábrica, além de indicar outras subáreas e equipamentos que são passíveis de estudos futuros de manutenção com base na confiabilidade. Um breve resumo do processo de produção da celulose será abordado na figura 2.1.

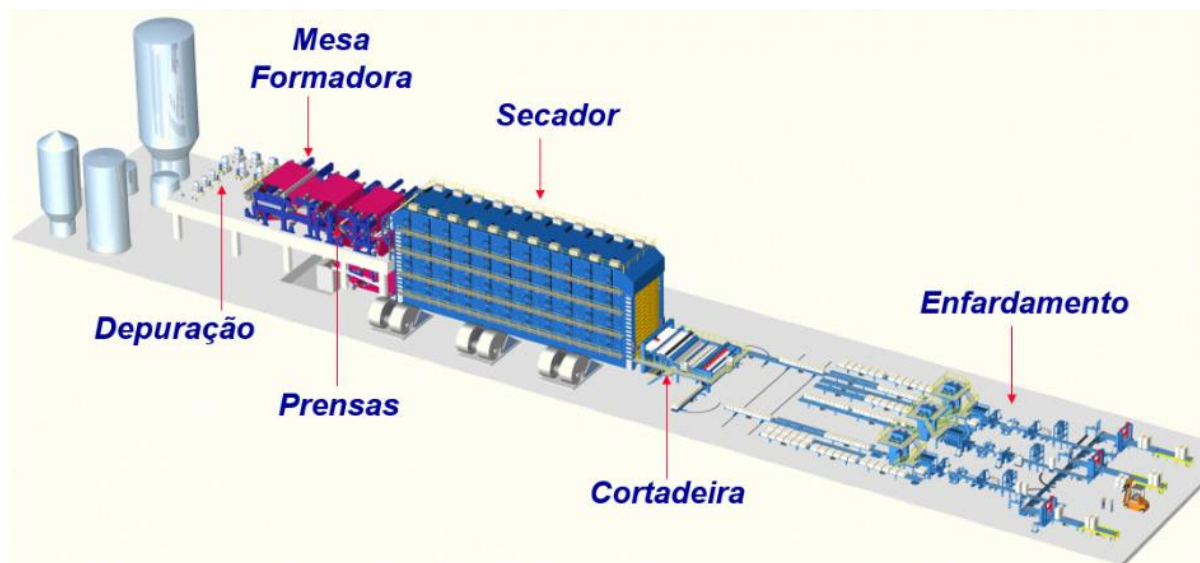
Figura 2.1 – Etapas do processo de produção de celulose branqueada



Fonte: Manual da Secagem, (2001).

A área de secagem de celulose geralmente é dividida em seis subáreas com funções conforme detalhado na figura 2.2:

Figura 2.2 – Subáreas do processo de secagem e enfardamento



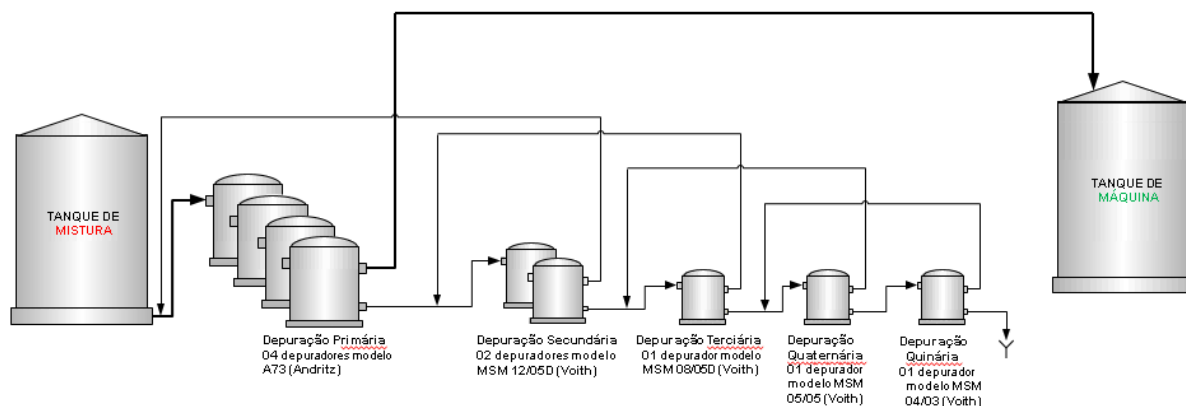
Fonte: Manual da Secagem, (2001).

As cinco áreas possuem igual importância no processo produtivo, visto que se trata de um sistema de produção em série. Impactos na performance dos equipamentos resultam em perdas imediatas de produção real de celulose.

## 2.1 DEPURAÇÃO DE MASSA BRANQUEADA

A função da depuração é remover as impurezas que possam ter sido transportadas juntamente com a massa branqueada. Normalmente é composta de equipamentos (depuradores, filtros, *canisters*) dispostos em série (estágios), visando maior eficiência na remoção de contaminantes do produto e garantia da qualidade, conforme apresentado na figura 2.3.

Figura 2.3 – Layout de depuração de massa branqueada



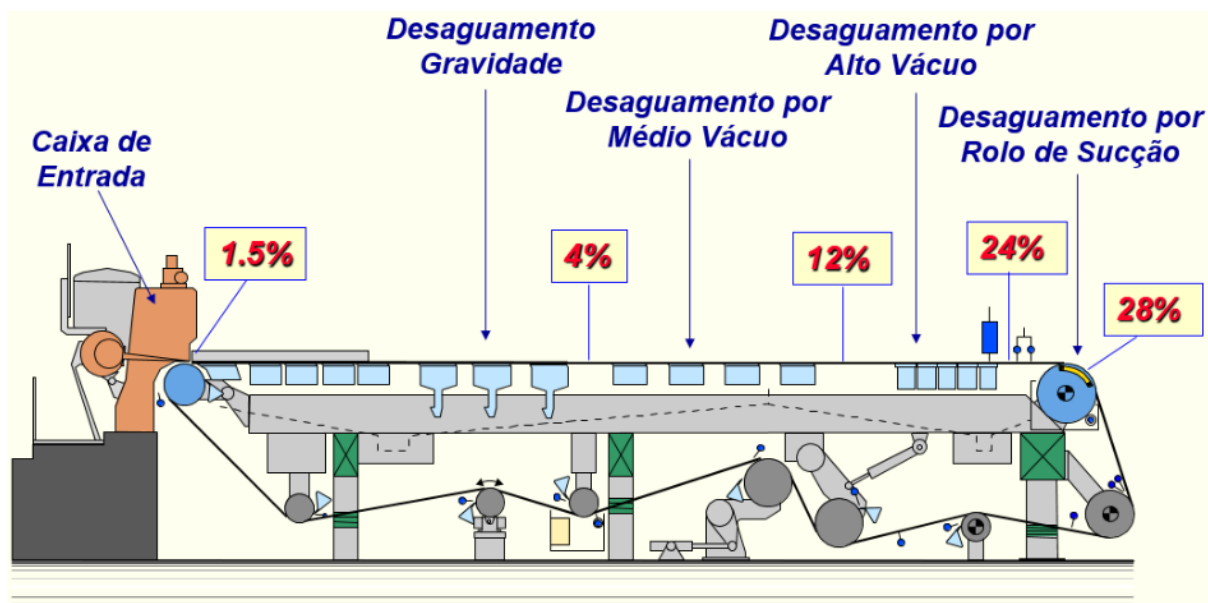
Fonte: Manual da depuração da secagem, (2001).

Após a depuração, a massa branqueada é bombeada para a mesa de formação, onde ocorrerá o início da formação da folha.

## 2.2 MESA DE FORMAÇÃO

Na mesa de formação, a massa branqueada é distribuída uniformemente sobre toda a largura da tela. Na sequência, o desaguamento é realizado por gravidade e pela aplicação de vácuo na parte inferior da tela e em um rolo de sucção, conforme esquema apresentado na figura 2.4.

Figura 2.4 – Layout da mesa de formação



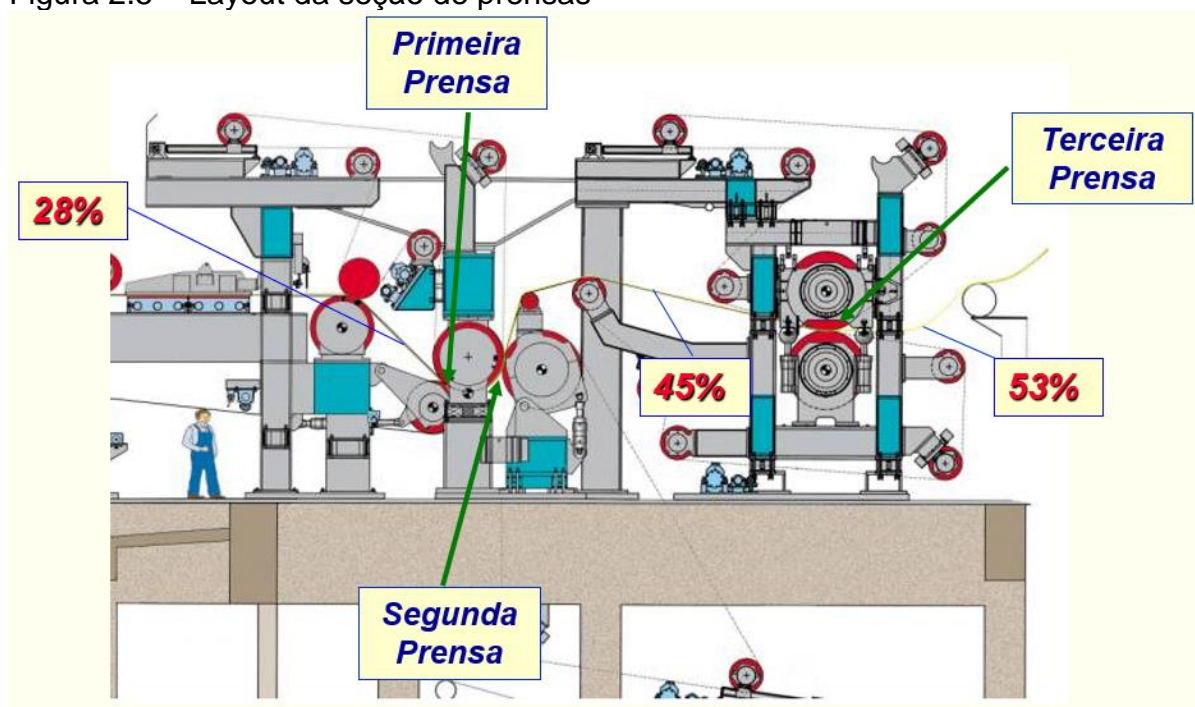
Fonte: Manual de operação da mesa plana, (2001).

Na saída da mesa de formação ocorre o início da formação da folha, onde a consistência é aumentada para cerca de 28%.

### 2.3 SEÇÃO DE PRENSAS

Após o início da formação da folha, a mesma é encaminhada para a seção de prensas. A prensagem da folha é realizada junto à feltros, por meio da formação de nip entre rolos e a aplicação de força por cilindros hidráulicos, conforme exibido na figura 2.5.

Figura 2.5 – Layout da seção de prensas



Fonte: Manual de operação das prensas, (2001).

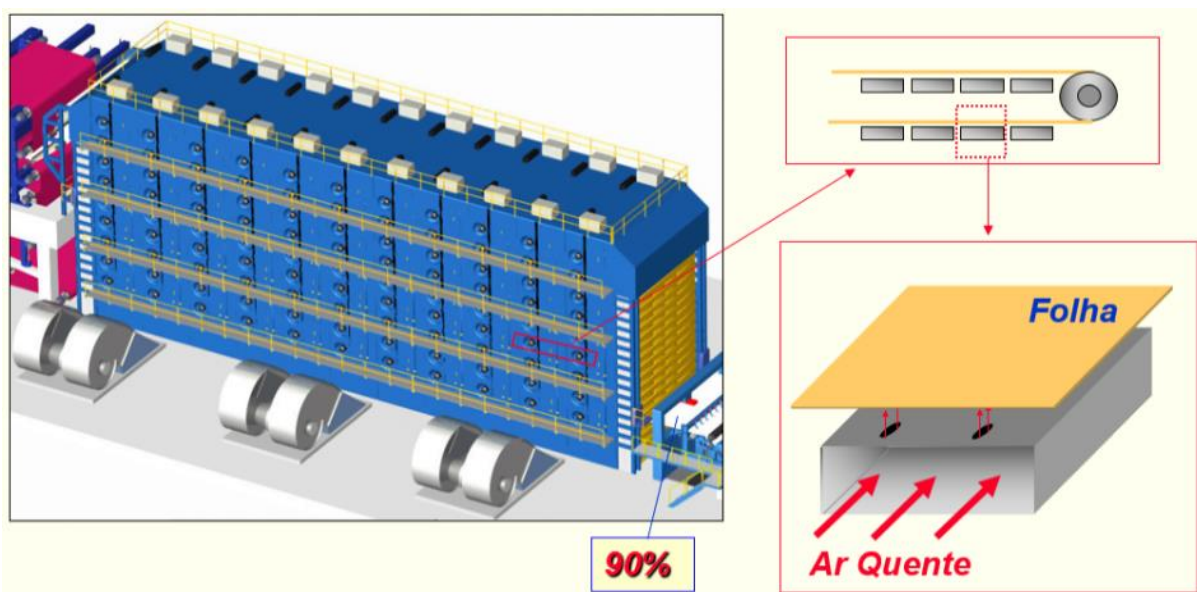
O objetivo nesta etapa do processo é o aumento de consistência de modo a constituir uma folha com resistência mecânica à tração suficiente para ser submetida ao secador. A consistência ao final da seção de prensagem atinge valores próximos a 53%.



## 2.4 SECADOR

O secador consiste em uma estrutura de torres de ventiladores, trocadores de calor, caixas de sopragem e rolos para transporte que tem por finalidade a remoção da umidade da folha. Após sair da seção de prensas, a folha é colocada no secador, que é a última etapa de sua formação, conforme observado na figura 2.6.

Figura 2.6 – Layout do secador e detalhe da caixa de sopragem



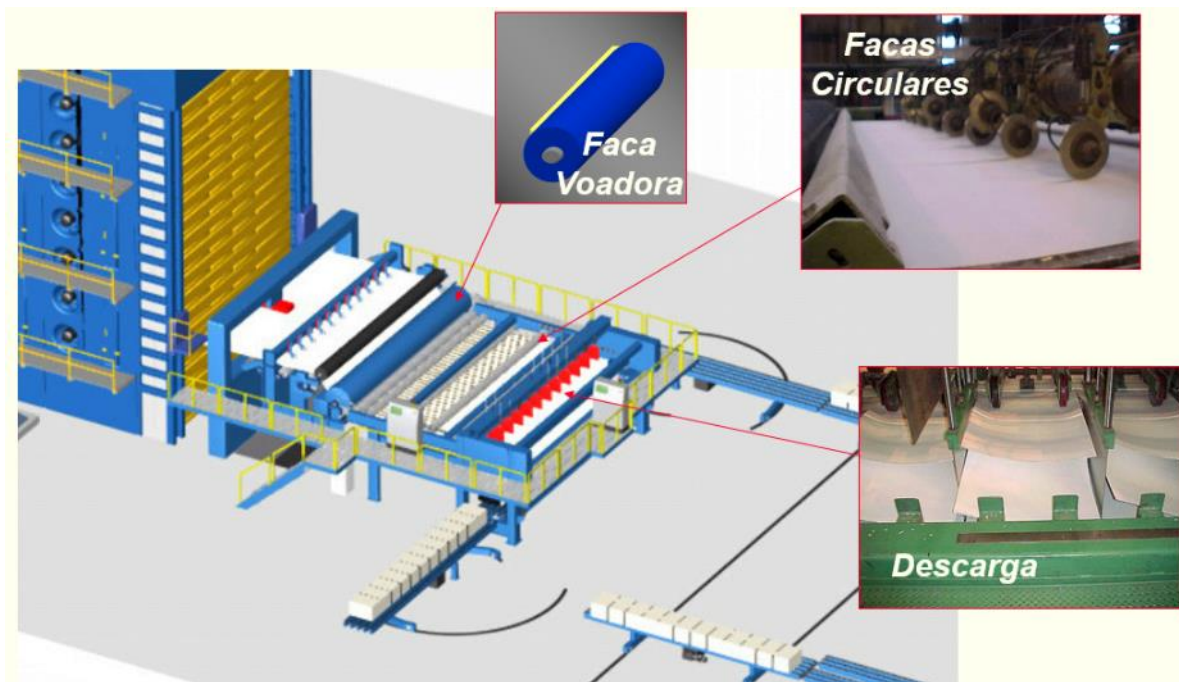
Fonte: Manual de operação do secador, (2001).

A consistência atinge valores de 88 a 90%, proporcionando resistência suficiente para que a mesma seja encaminhada à seção de corte.

## 2.5 CORTADEIRA

Após sair do secador, a folha é conduzida para a cortadeira. São realizados cortes longitudinais e transversais, para permitir que a celulose seja empilhada e descarregada, formando fardos, conforme figura 2.7.

Figura 2.7 – Layout da cortadeira de celulose



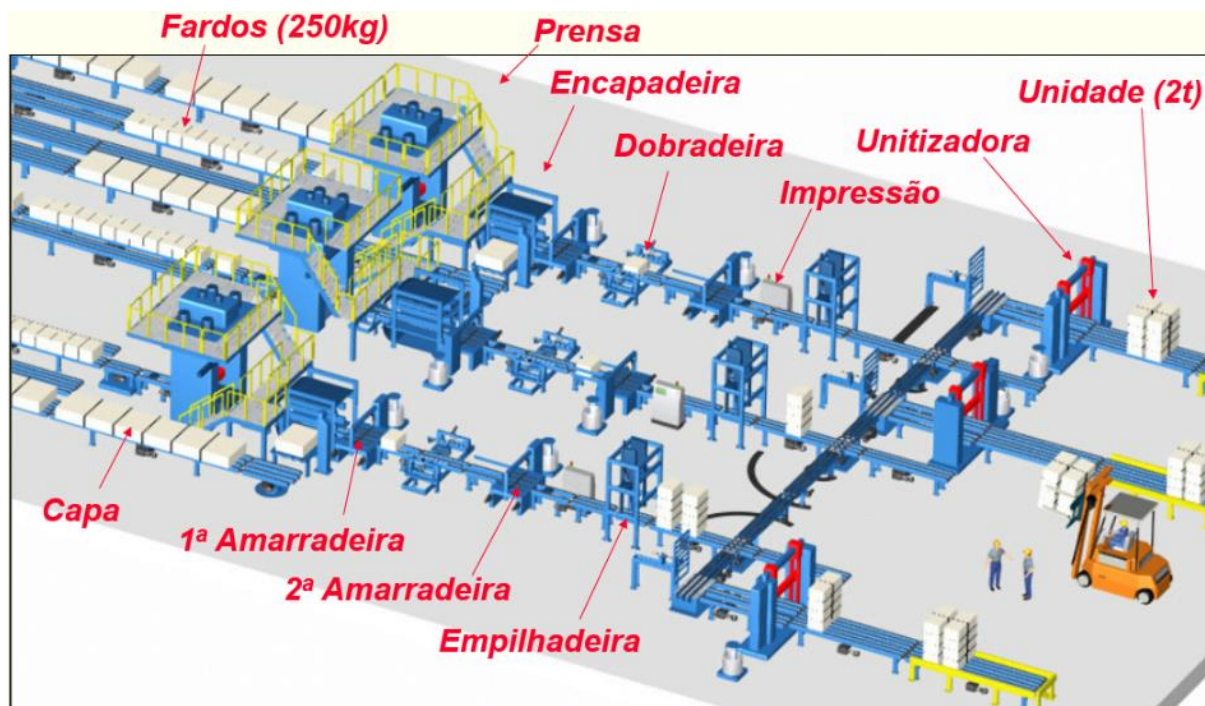
Fonte: Manual de operação da cortadeira, (2001).

As pilhas de folhas formadas são chamadas de fardos, e estes são direcionados às linhas de enfardamento para acabamento final.

## 2.6 ENFARDAMENTO

Na seção de enfardamento, objeto de estudo desse trabalho, os fardos têm seu volume reduzido por prensagem, são embalados, identificados por marcação, empilhados e amarrados, formando uma unidade (*unit*), conforme exibido na figura 2.8.

Figura 2.8 – Layout do enfardamento de celulose



Fonte: Manual do enfardamento, (2001).

Essencialmente, os equipamentos das linhas de enfardamento são divididos em dois grupos: transportadores e equipamentos de processo.

Os detalhes de funcionamento dos equipamentos das linhas de enfardamento serão abordados nas seções a seguir.

### 2.6.1 Transportadores

Os transportadores têm como função conduzir os fardos recém-formados por todo circuito de embalagem, alimentando os equipamentos de processo para que suas funções específicas sejam executadas. Basicamente possuem estrutura e componentes, conforme figura 2.9.

Figura 2.9 – Componentes dos transportadores de fardos



Fonte: Manual de manutenção do transportador, (2003).

Os transportadores são divididos em dois grupos: transportadores móveis e transportadores fixos. Os transportadores móveis possuem sistema que desloca sua mesa (estrutura) para fins de alinhamento ou nivelamento com os transportadores predecessores e sucessores. Os transportadores fixos possuem base metálica instalada em sapata de concreto, portanto não realizam movimento de elevação, rotação ou translação. São utilizados basicamente para armazenamento e transporte de fardos.

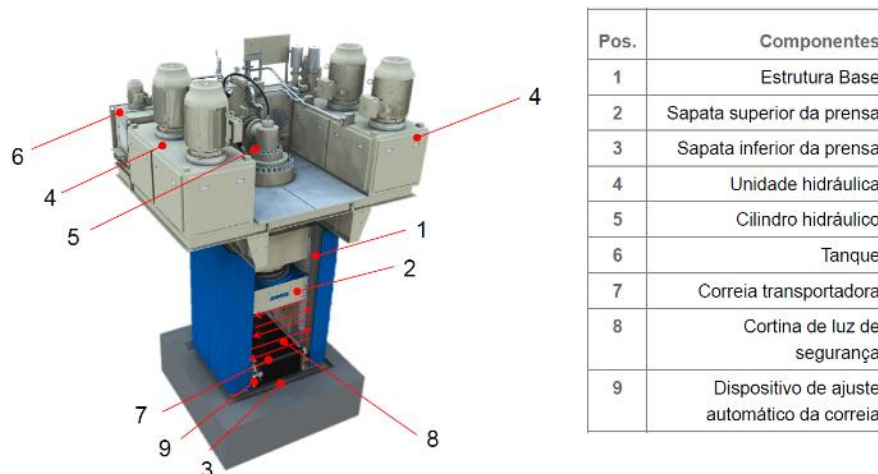
## 2.6.2 Equipamentos de Processo

Os equipamentos de processo realizam função específica sobre os fardos, tais como: prensagem, aplicação de capa, impressão de identificadores, empilhamento e amarração.

### 2.6.2.1 Prensa de Fardos

Consiste de uma prensa hidráulica com capacidade de prensagem de 1000 tons, cuja função ao prensar o fardo é a redução do volume do mesmo para que possa ser embalado e amarrado, conforme figura 2.10.

Figura 2.10 – Prensa de fardos de celulose



Fonte: Manual de manutenção da prensa de fardos, (2003).

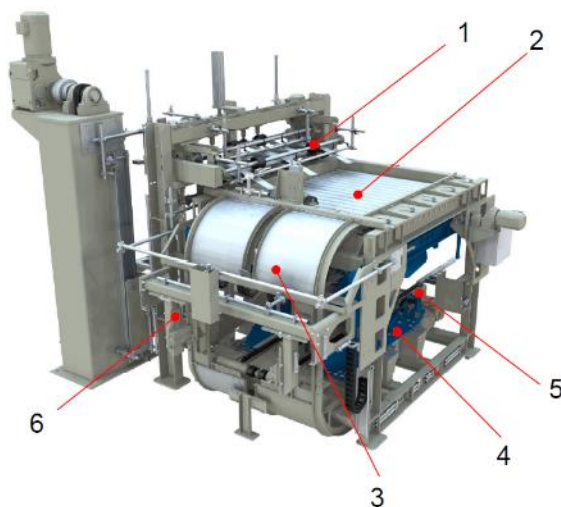
Por se tratar de um equipamento predominantemente hidráulico e com ciclo de funcionamento totalmente automatizado, as principais causas de paradas deste tipo de equipamento estão associadas à vazamentos em tubos e mangueiras, baixo rendimento de bombas hidráulicas, falhas em conectores, cartões elétricos e relés.

As prensas de fardos são os equipamentos com maior tempo de ciclo da linha, tornando-se “gargalos” para a produção.

#### 2.6.2.2 Encapadeira

Equipamento cuja função é aplicar a capa nos fardos e guiar a mesma para a posterior amarração, conforme figura 2.11.

Figura 2.11 – Encapadeira de fardos



Pos.	Componentes
1	Conjunto de rolos de alimentação
2	Roletes de alimentação
3	Placas guia
4	Paletas de dobragem
5	Transportador de corrente
6	Grampos de folhas

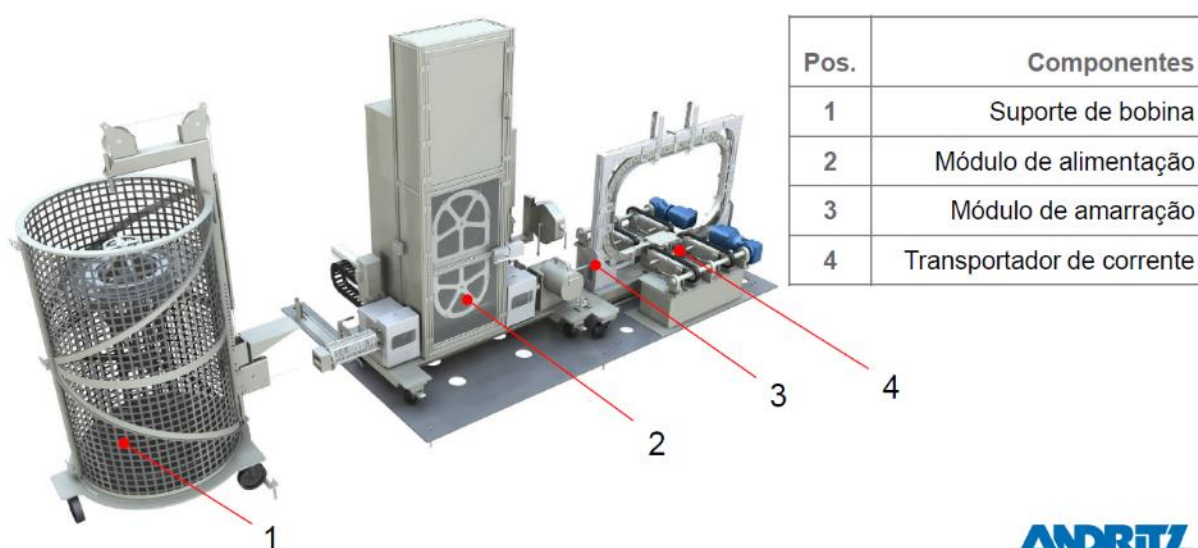
Fonte: Manual de manutenção da encapadeira, (2003).

Este tipo de equipamento possui sistema de acionamento hidráulico, pneumático e elétrico. Devido à sua característica construtiva conter vários elementos com movimentos articulados, retilíneos e rotativos, torna-se bastante frequente a ocorrência de desgastes de pinos, buchas, rótulas e guias de deslizamento.

### 2.6.2.3 Amarradeira de Fardos

Equipamento que realiza a amarração da capa no fardo pela aplicação de arame de aço com  $\varnothing$  2,0 mm, conforme figura 2.12.

Figura 2.12 – Amarradeira de fardos



Fonte: Manual de manutenção da amarradeira de fardos, (2003).

Este equipamento é constituído de vários componentes de tamanho reduzido e com ajustes complexos. Quaisquer desvios dimensionais no circuito de passagem do arame (trilhos, guias, canais) fazem com que ocorram falhas neste equipamento.

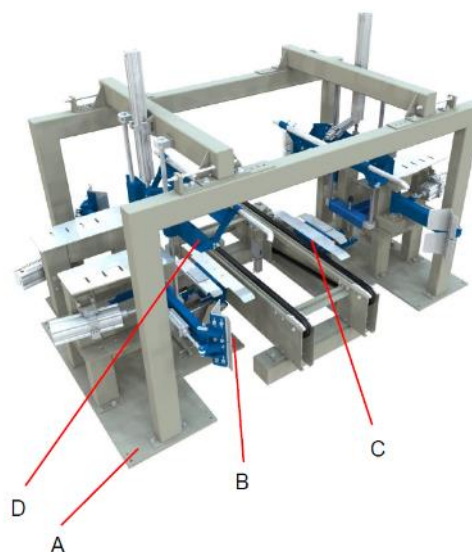
#### 2.6.2.4 Dobradeira de Fardos

Realiza a dobra da capa do fardo após esta ser aplicada pela encapadeira e fixada por arame na 1ª amarradeira, conforme figura 2.13.

Figura 2.13 – Dobradeira

Componentes principais:

Item	Componente estrutural
A	Estrutura
B	Braços da paleta lateral
C	Paletas inferiores
D	Barra superior



Fonte: Manual de manutenção da dobradeira, (2003).

A dobradeira realiza seus movimentos de maneira altamente precisa, similar a um robô. Possuindo diversos componentes deslizantes (rodas, guias, olhais, pinos), quaisquer desvios, mesmo que mínimos, impactarão no ciclo e poderão fazer com que a embalagem do fardo seja avariada durante o processo de dobra.

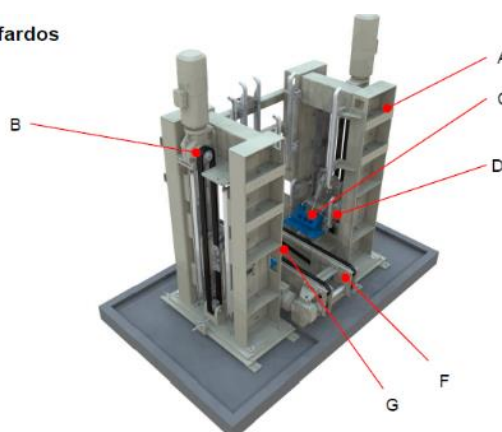
#### 2.6.2.5 Empilhador de Fardos

Equipamento responsável pela realização de empilhamento em pilhas de quatro fardos para posterior amarração e formação de uma unidade, conforme figura 2.14.



Figura 2.14 – Empilhador de Fardos

Empilhador de fardos



A	Estrutura base	D	Braços laterais
B	Dispositivo de elevação	F	Transportador de corrente
C	Dispositivo giratório	G	Dispositivo de elevação

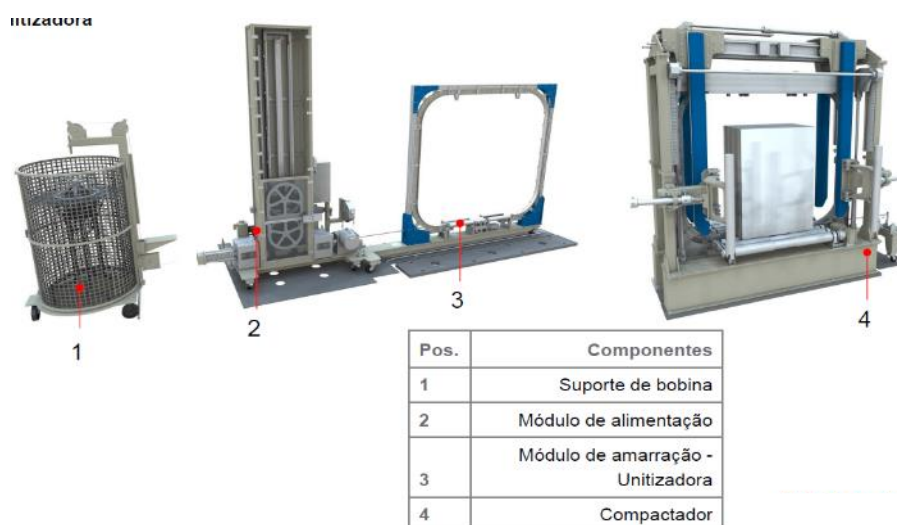
Fonte: Manual de manutenção do empilhador de fardos, (2003).

O ajuste da guia de empilhamento é de elevada importância para que os fardos não fiquem desalinhados quando colocados uns sobre os outros. Este processo é essencial para que possam ser formadas pilhas de fardos no armazém.

#### 2.6.2.6 Unitizadora

Na unitizadora os fardos são amarrados em duas pilhas de quatro fardos, formando assim uma unidade (*unit*). Esta amarração é feita para fins de transporte e armazenamento da celulose, conforme figura 2.15.

Figura 2.15 – Unitizadora de Fardos



Fonte: Manual da unitizadora de fardos, (2003).

Este é o último equipamento de processo da linha de embalagem. A amarração dos fardos é feita por arames de 3,0mm de diâmetro, sendo aplicados sete arames em cada *unit*.

## 2.7 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado resumidamente a função da área de secagem e enfardamento no processo de produção de celulose. O enfoque maior ocorreu nos equipamentos de enfardamento e suas respectivas funções.

As informações apresentadas neste capítulo servirão de base para o entendimento da aplicação das ferramentas de confiabilidade nestes equipamentos.

Os sistemas, subsistemas e componentes dos equipamentos serão objeto de estudo no capítulo 4. A determinação dos itens de menor confiabilidade será fundamental para a elaboração de uma estratégia de manutenção que resulte no aumento da disponibilidade da linha.

No próximo capítulo serão abordados os conceitos e referenciais teóricos de confiabilidade, das distribuições de probabilidade e das ferramentas que, por meio da análise do histórico de manutenção dos equipamentos apresentados no capítulo 2, serão aplicadas no capítulo 4.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Dada a necessidade da melhora na disponibilidade dos equipamentos das linhas de enfiamento de celulose através da redução das falhas aleatórias que ocorrem nos equipamentos, foi realizado um estudo buscando o conjunto de ferramentas mais adequado para atingir o objetivo. Devido a disponibilidade de informações que podem ser refinadas, opta-se pela utilização da análise de dados de vida (LDA) para os principais subsistemas e componentes dos equipamentos e a construção de diagramas de bloco de confiabilidade (RBD) para determinar e analisar os equipamentos, subsistemas/componentes de menor confiabilidade e determinar as ações corretivas e preventivas.

#### 3.1 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA)

Em Reliasoft (2015), a análise de dados de vida consiste no estudo e modelagem de dados de vida de uma amostra de equipamentos (incluindo seus sistemas, subsistemas e componentes) ou produtos. Os tempos de vida podem ser mensurados em diversas unidades, tais como horas, quilômetros rodados, quantidade de ciclos, etc., ou seja, qualquer unidade mensurável que pode ser associada ao tempo de vida do equipamento.

Segundo Kececioglu (2002), a confiabilidade é a melhor medida quantitativa da integridade de uma parte, componente, produto ou sistema. Confiabilidade é a probabilidade das partes, componentes, produtos ou sistemas executarem as funções as quais eles foram projetados sem falha em condições específicas por períodos designados à um nível de confiança dado.

De acordo com Reliasoft (2015), o processo de análise de dados de vida tem como alvo estimar ou fazer previsões acerca da vida dos componentes por meio da adaptação de uma distribuição de probabilidade aos dados. Dessa forma, os parâmetros das distribuições podem ser utilizados para estimar dados importantes da vida dos componentes tais como a confiabilidade ou probabilidade de falha para condição e tempo específico de operação e a vida média.

Segundo Kececioglu (2002), não há indústria em qualquer país que possa progredir de forma eficiente sem o conhecimento e implementação da engenharia de confiabilidade.

Dessa forma, a aplicação das análises de dados de vida é de fundamental importância para tornar mais robusto o sistema de gestão de manutenção, com ganhos exemplificados a seguir:

- Aumentar o entendimento acerca da vida dos componentes dos equipamentos;
- Tornar possível mensurar e estimar indicadores para performance dos equipamentos;
- Estabelecer as melhores práticas e estratégias de manutenção, com base em informações obtidas com a aplicação da análise de dados de vida.
- Diminuição dos custos de manutenção por meio de diminuição das manutenções corretivas e manutenções preventivas mais ajustadas.

Para realização de análises de dados de vida de maneira consistente, é necessário seguir os passos a seguir:

- Obter os dados de vida do equipamento, sistema ou componente analisado;
- Selecionar a melhor distribuição de probabilidade que melhor se encaixa aos dados;
- Estimar os parâmetros para a distribuição;
- Gerar os gráficos e resultados de vida característica do produto, tais como confiabilidade, probabilidade de falha e vida média.

As distribuições Weibull e exponencial, que são amplamente utilizadas, serão abordadas nas seções 3.1.1 e 3.1.2, respectivamente.

### 3.1.1 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL

Em Reliasoft (2015), a distribuição Weibull é amplamente utilizada por ser bastante flexível, pois o comportamento da taxa de falha pode ser crescente, decrescente ou constante.

A equação 1 indica a função de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull:

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} e^{-t^{\frac{\gamma}{\theta}}} \quad \text{Eq. 1}$$

A equação 2 mostra a função de confiabilidade de acordo com a distribuição de Weibull:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma}} \quad \text{Eq. 2}$$

A equação 3 ilustra o tempo médio até a falha sob os moldes de a distribuição de Weibull.

$$MTTF = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad \text{Eq. 3}$$

A pdf da distribuição Weibull pode ter diversos formatos e se aproximar das outras distribuições de probabilidade.

### 3.1.2 DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL

De acordo com Reliasoft (2015), A distribuição exponencial caracteriza-se por ter uma função de taxa de falha constante, sendo a única com essa propriedade.

A equação 4 indica a Função de densidade de probabilidade sob a distribuição exponencial:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{Eq. 4}$$

A equação 5 mostra a função de confiabilidade de acordo com a distribuição exponencial:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{Eq. 5}$$

A equação 6 ilustra o tempo médio até a falha de acordo com a distribuição exponencial:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Eq. 6}$$

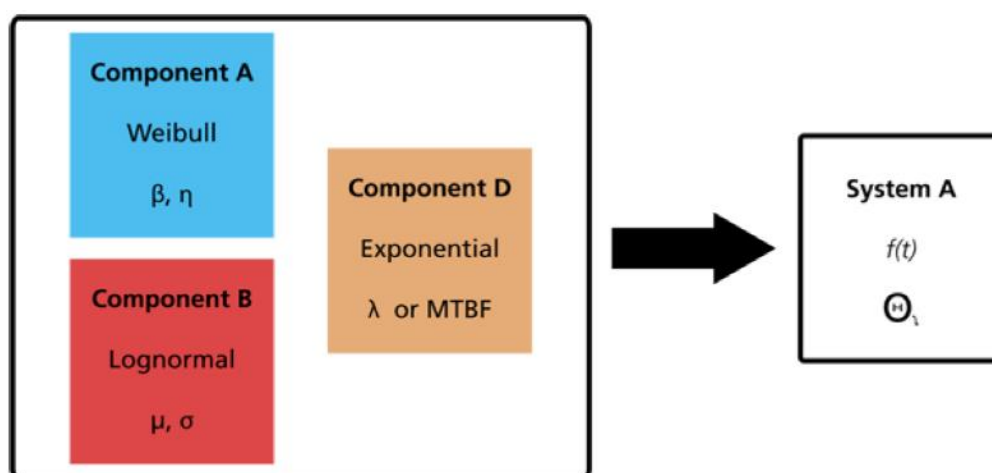
Em termos matemáticos, ela é a mais simples e é amplamente utilizada para descrever a vida característica de uma série de materiais, equipamentos, sistemas e componentes.

### 3.2 DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE (RBD) E ANÁLISE RAM

Segundo Reliasoft (2015), a análise de confiabilidade aplicada em sistemas consiste na construção de um modelo lógico (diagrama de blocos) que represente um equipamento, sistema, subsistema ou componente, onde cada elemento possui sua própria distribuição de vida.

Em Reliasoft (2015), os diagramas de blocos são utilizados para descrever a relação entre os componentes e definir o sistema. O nível de escolha por parte do analista de confiabilidade (sistema, subsistema ou componente) irá determinar a quão detalhada e profunda será a análise.

Figura 3.1 – Representação lógica de um sistema



Fonte: Reliasoft (2015)

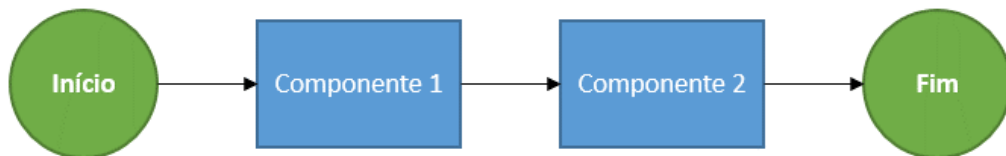
De acordo com Mazzei (2018), o diagrama representativo do equipamento é utilizado na análise RAM – *Reliability, Availability and Maintainability* para a simulação e avaliação do desempenho de seus sistemas e componentes visando definir aqueles com maior criticidade e impacto na disponibilidade.

Em Reliasoft (2015), os blocos podem ser dispostos em várias configurações, de modo a melhor representar o sistema no mundo real. A seguir serão abordados os principais arranjos de blocos nos diagramas de confiabilidade.

### 3.2.1 SISTEMA EM SÉRIE

Em Reliasoft (2015), na configuração em série, o componente com a menor confiabilidade tem o maior efeito na confiabilidade do sistema.

Figura 3.2 – Exemplo de sistema em série.



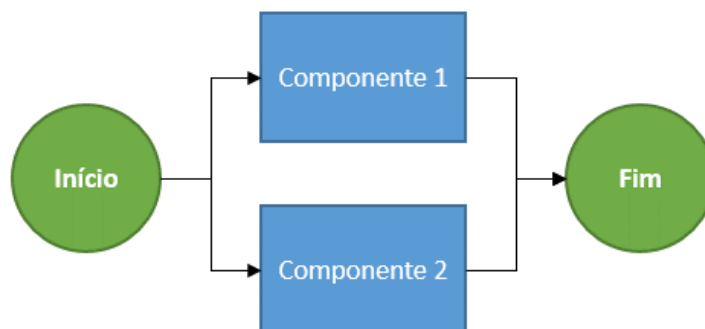
Fonte: adaptado de Reliasoft (2015)

Caso algum dos componentes apresente falha, o sistema perderá sua função.

### 3.2.2 SISTEMA EM PARALELO

Segundo Reliasoft (2015), na configuração em paralelo, pelo menos um dos blocos deve apresentar funcionamento satisfatório para que o sistema funcione.

Figura 3.3 – Exemplo de sistema em paralelo.



Fonte: adaptado de Reliasoft (2015)

Os componentes em paralelo também são chamados de redundância. As redundâncias possuem elevada importância para o desenvolvimento de sistemas confiáveis, sendo um dos vários métodos de se atribuir confiabilidade a um sistema. É altamente utilizada nos setores aeroespaciais e de aviação nos sistemas de maior criticidade.

Existem três tipos de componentes em *standby*:

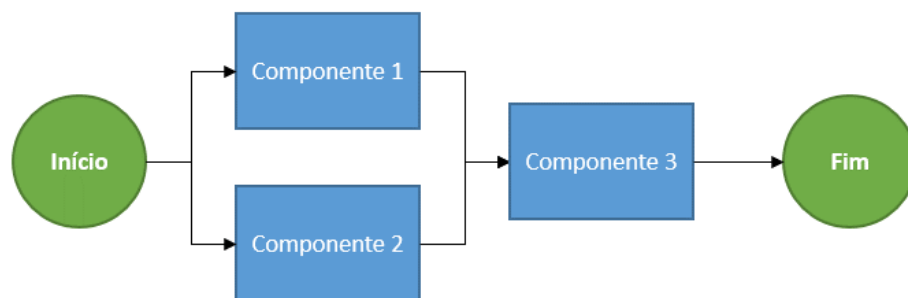
- *Cold standby*: componentes que não irão falhar quando em modo *standby*.
- *Warm standby*: componentes que possuem taxa de falha reduzida quando em modo *standby*, quando comparados com o componente ativo.
- *Hot standby*: componentes que possuem a mesma distribuição de falha tanto em modo *standby* quanto em modo ativo.

Para a correta modelagem do sistema, o analista deve conhecer a condição de funcionamento dos componentes, afim de selecionar o tipo correto de componente *standby*.

### 3.2.3 SISTEMA MISTO

Segundo Mazzei (2018), na maioria dos casos, os sistemas no mundo real apresentam configurações de maior complexidade, não podendo ser representados apenas em sistemas em série e/ou paralelo.

Figura 3.4 – Exemplo de sistema misto.



Fonte: adaptado de Reliasoft (2015)

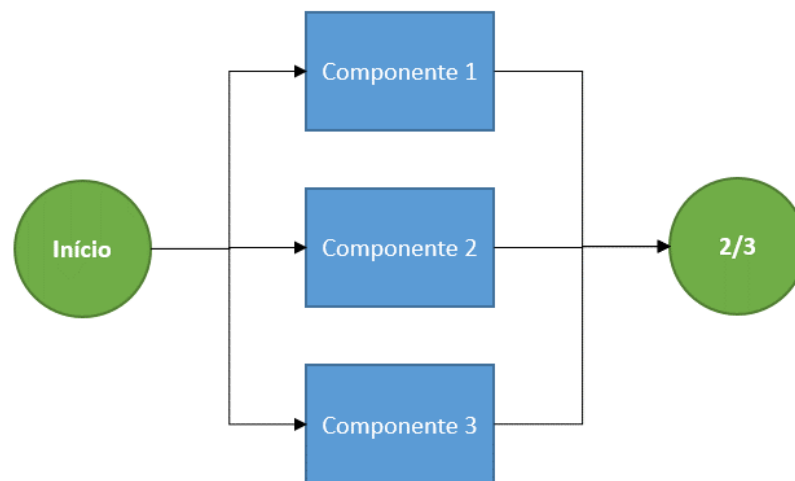
Com isso, se faz necessário muitas vezes utilizar o sistema misto, de modo a calcular a confiabilidade dos sistemas individualmente em série e paralelo, a fim de se obter a confiabilidade do sistema.



### 3.2.4 SISTEMA K DE N

Em Reliasoft (2015), este tipo de configuração é um caso especial do sistema em paralelo. No sistema k de n, é requerido que pelo menos k de n componentes em paralelo apresentem sucesso para que o sistema execute a sua função.

Figura 3.5 – Exemplo de sistema k de n.



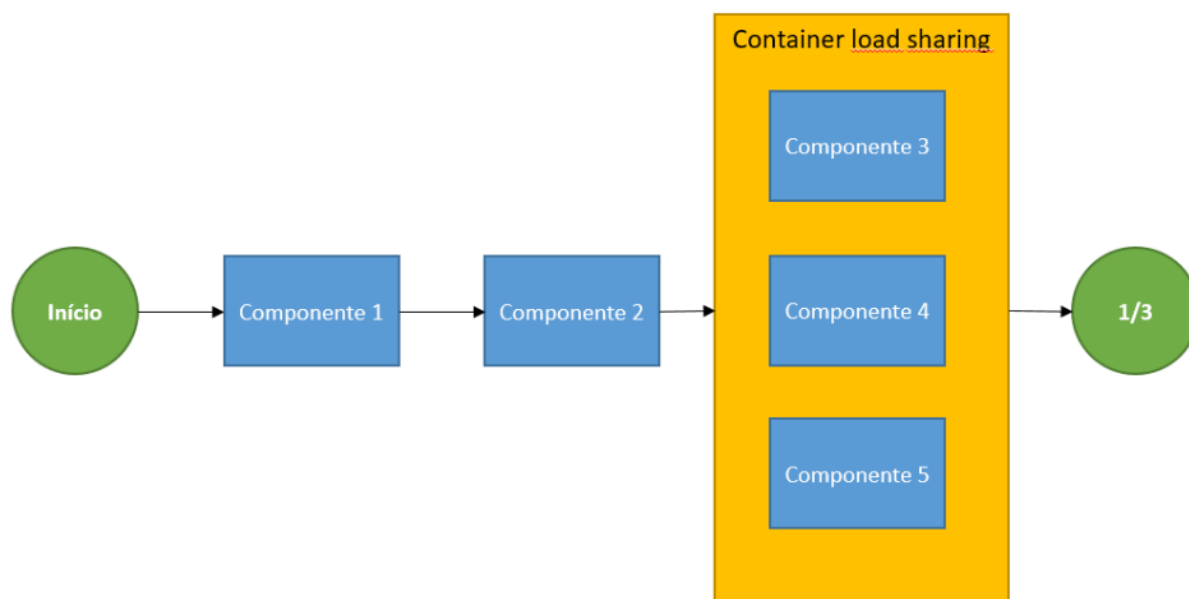
Fonte: adaptado de Reliasoft (2015)

No exemplo acima, é necessário que 02 dos 03 componentes do sistema apresentem funcionamento satisfatório para que o sistema execute a sua função.

### 3.2.5 SISTEMA LOAD SHARING

Segundo Mazzei (2018), na configuração *load sharing*, caso um componente apresente falha, os componentes restantes do sistema sofrem um aumento de carga para que o sistema seja mantido funcional.

Figura 3.6 – Exemplo de sistema *load sharing*.



Fonte: adaptado de Reliasoft (2015)

No exemplo da figura 3.6, os componentes 3, 4 e 5 estão em um container *load sharing* e possuem suas próprias vidas características. Todos os três necessitam falhar para que o sistema apresente falha funcional. No entanto, caso um dos componentes falhe, a vida característica dos componentes restantes será alterada, visto que eles deverão assumir a carga do componente que falhou.

### 3.3 FTA (*FAULT TREE ANALYSIS*)

Em Rigoni (2018), a análise de árvore de falhas (*Fault Tree Analysis – FTA*) consiste em um método dedutivo e lógico que parte de um evento indesejado (falha) buscando as possíveis causas desse evento. O FTA é um tipo de análise *top-down*, onde parte-se dos efeitos para as causas.

Ainda de acordo com Rigoni (2018), ao se construir um diagrama de FTA é possível obter uma completa compreensão lógica das causas básicas e suas relações com o evento de topo.

Pode-se citar como objetivos da realização de um FTA:


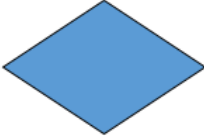



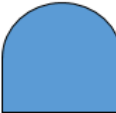
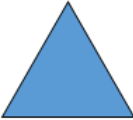
- Identificação das causas de uma falha e o relacionamento lógico entre suas possíveis causas;
- Identificar as deficiências de um sistema;

- Identificar consequências de erros humanos;
- Estabelecer criticidade de sistemas e componentes de equipamentos;

### 3.3.1 Simbologia

Em Reliasoft (2015), a análise FTA faz uso de simbologia padronizada para descrever os sistemas físicos na forma de sistemas lógicos. A seguir são apresentadas as simbologias dos principais componentes.

Figura 3.7 – Simbologia básica FTA

Símbolo:	Representação / Função:
	Evento de topo (falha)
	Causa básica (raiz) ou Evento com alta probabilidade de ocorrência
	Evento não desenvolvido
	Eventos condicionais
	Porta OU – o evento de saída (acima) ocorre se algum dos eventos do nível inferior ocorrerem.
	Porta E – o evento de saída (acima) ocorre se todos os eventos do nível inferior ocorrerem.
	Porta de Transferência – utilizada para transferir para outra parte da árvore de falha

Fonte: adaptado de Reliasoft (2015)

Para desenvolver uma FTA é necessário:

- Definir o evento superior (problema ou falha);
- Determinar os eventos intermediários que sejam suficientes para resultar no evento superior;
- Determinar as causas imediatas para a ocorrência dos eventos intermediários;
- Determinar as portas adequadas para estabelecer as relações;
- Determinar as causas básicas dos eventos intermediários.

A análise por FTA constitui uma excelente ferramenta para aprofundamento de causas básicas de falhas e será amplamente utilizada nesse trabalho, visando um maior entendimento sobre as condições de funcionamento dos equipamentos.

### 3.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado resumidamente o referencial teórico que será utilizado para a elaboração das análises de confiabilidade no capítulo 4. Foram abordadas as distribuições de probabilidade Weibull e Exponencial, que são as mais comumente utilizadas nas análises por sua abrangência.

As análises de dados de vida e a análise RAM com a construção dos RBD's serão largamente aplicados, afim de se obter informações quantitativas acerca da vida característica dos sistemas e subsistemas dos equipamentos das linhas de enfiamento. O aprofundamento das causas será feito utilizando a ferramenta FTA.

No capítulo 4 as informações obtidas através da higienização dos dados históricos dos equipamentos de enfiamento serão apresentados e serão obtidas as distribuições de vida dos subsistemas e equipamentos.

Na sequência, serão construídos os diagramas de bloco de confiabilidade e a confiabilidade da linha de enfiamento inteira será obtida. Os equipamentos e seus respectivos subsistemas serão avaliados, a fim de se encontrar os itens de menor confiabilidade, para que possam ser analisados e que se estabeleça a melhor estratégia de manutenção para evitar as falhas.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Nesse capítulo será abordado o detalhamento das etapas do trabalho e as respectivas análises (LDA, RAM e FTA), buscando conhecer os componentes e sistemas de menor disponibilidade para elaboração dos planos de ação para solução dos problemas.

O foco foi direcionado para uma das oito linhas de enfiamento. A linha número 04 foi selecionada devido a sua maior criticidade (linha que possui maior dificuldade e tempo de transferência de produto em caso de parada).

Os equipamentos de processo e transportadores são idênticos às demais linhas, logo os planos de ação também poderão ser estendidos às mesmas.

Tomou-se o banco de dados de intervenções de manutenção e operação (sistema de registro de ocorrências) para a higienização dos dados e posterior inserção no software de análise de confiabilidade. Este banco de dados foi selecionado devido ao mesmo ser mais rico em informação do que o sistema ERP da empresa.

Foi construída uma planilha contendo os dados de intervenções de manutenção e operacionais da linha de enfiamento a ser estudada. O alcance do banco de dados compreende 4,5 anos, sendo de janeiro/2015 a julho/2019. Foram filtradas as intervenções das disciplinas de manutenção (mecânica, elétrica, instrumentação, caldeiraria e solda) relativas à indisponibilidade da linha, sendo corretivas emergenciais e preventivas programadas.

Devido ao fato de estar trabalhando com grande quantidade de informações de indisponibilidade e se tratarem de dados cuja carga é feita por operadores das linhas de enfiamento, foi preciso realizar uma revisão e um tratamento destes dados de falha e reparo. A planilha de modelagem foi utilizada para o tratamento destas informações prevenindo que possíveis inconsistências não afetassem os resultados da análise.

Figura 4.1 – Planilha do banco de dados de intervenções.

Linha: Enfardamento L4  
 Área: Secagem L4  
 Especialidade: Mecânica, Elétrica, Instrumentação e Hidráulica  
 Data Inicial BD: 01/01/2015  
 Data Final BD: 01/07/2019

**Banco de Dados de Falha e Suspensões**

Fonte: Sistema de Análise Crítica Diária

Início	Fim	Unidade	Local Inst.	Descrição Ocorrência	Tempo	Descrição Ocorrência	Equipamento	Componente	Modo de Falha	TTF (dia)	FFS
12062015 16:30	12062015 17:20	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica	00:50:00	Pressão de Fardos com paradas intermitentes.	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Indicação falsa		
30042015 04:20	30042015 05:30	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica	01:10:00	Parada da prensa de fardos bloqueada pela	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Sensor fora de posição	76,43	F
22062015 21:40	22062015 22:10	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica	00:30:00	Parada da prensa de fardos com bloqueio pela	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Indicação falsa	53,72	F
22062015 03:30	09072015 15:00	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica	11:30:00	- Falhas na barreira de luz da prensa; - Acionada	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Indicação falsa	4,24	F
06092016 07:20	06092016 07:31	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica	00:11:00	Pressão de fardos com intertravamento	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Indicação falsa	103,16	F
09092016 11:50	09092016 12:10	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica	00:20:00	Pressão com cortina de luz intertravando entrada	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Indicação falsa	3,13	F
18092017 06:55	18092017 07:10	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica	00:15:00	Pressão de fardos não esta liberando os fardos.	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Indicação falsa	367,80	F
14092017 13:00	14092017 13:00	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica turno	00:00:00	- Falha cortina de luz, realizado força e liberado	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Sensor queimado	276,25	F
02092018 10:00	02092018 12:00	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica Turno		- Cortina de luz em falha intertravando	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Indicação falsa	138,80	F
30042018 06:50	30042018 07:43	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica turno	00:53:00	- Falha cortina de luz	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Indicação falsa	58,67	F
09062018 09:00	09062018 16:00	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica turno	07:00:00	- Parada da prensa de fardos devido	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Indicação falsa	40,09	F
12062018 09:00	12062018 11:50	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica	02:50:00	09:00 h Parada da Pressão de Fardos ( Falha	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Indicação falsa	3,00	F
22062018 11:20	22062018 12:43	Enfardamento L4	20-3256-3	Elétrica turno	01:23:00	Falha elétrica na cortina	Pressão de Fardos	Barreira de luz	Falha na barreira	11,10	F

Fonte: o autor (2019).

Os dados de vida dos componentes e subsistemas dos equipamentos foram inseridos no software Weibull++ e os cálculos dos parâmetros de confiabilidade foram feitos, obtendo-se as curvas de confiabilidade e taxa de falhas.

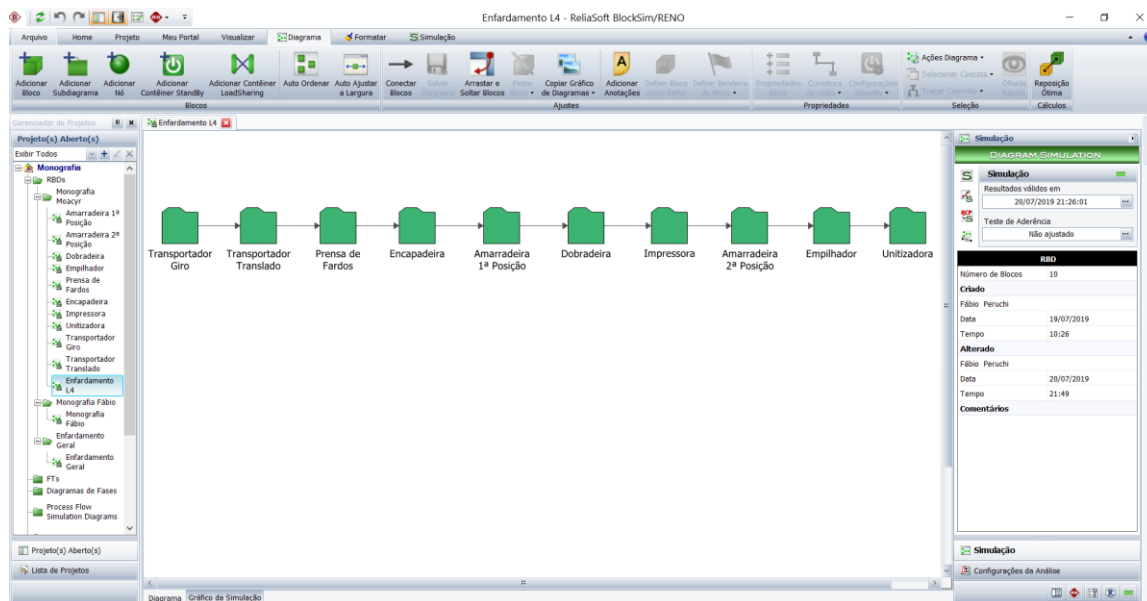
Figura 4.2 – Dados de vida inseridos no software Weibull++.

Condição	Tempo até F ou S (dia)	IDs Subconjunto 1
F	83,96527778	
F	44,36805556	
F	46,40277778	
F	12,08333333	
F	126,2638889	
F	9,857638889	
F	104,9895833	
F	75,79513889	
F	25,15	
F	51,88819444	
F	138,1388889	
F	211,0416667	
F	312,7118056	
F	261,3194444	
S	32,34375	

Fonte: o autor (2019).

Os dados provenientes de cada análise foram inseridos no modelo lógico do enfardamento produzido no software BlocksSim, mostrado na figura 4.3.

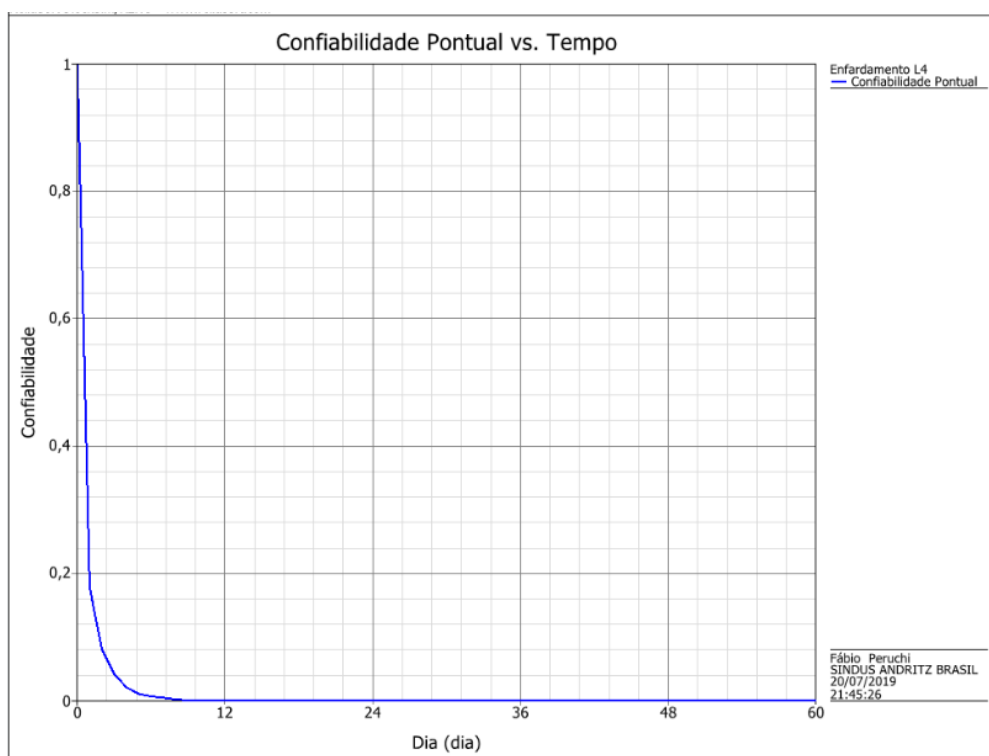
Figura 4.3 – Modelagem da linha de enfiamento.



Fonte: o autor (2019).

Um total de 10 equipamentos foram analisados pelo fato de apresentarem histórico de falhas e compunham dessa forma a curva de confiabilidade da linha de enfiamento, exibida no gráfico 4.1.

Gráfico 4.1 – Curva de confiabilidade pontual da linha de enfiamento.

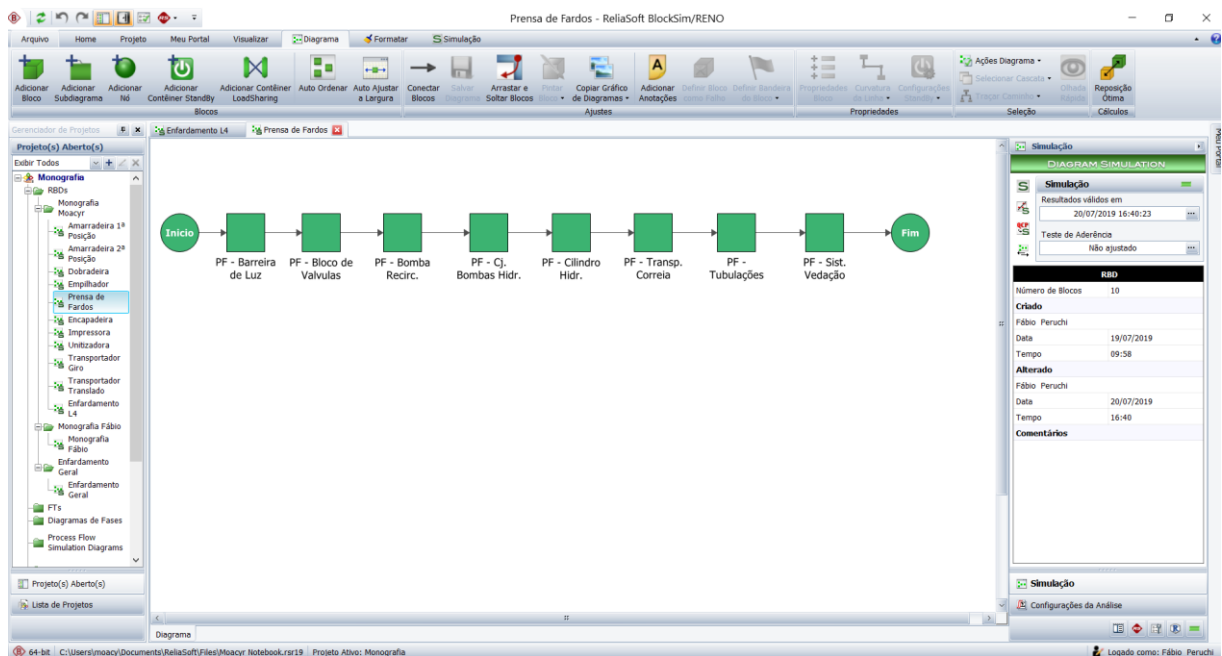


Fonte: o autor (2019).

Verifica-se que a confiabilidade pontual decresce bruscamente em um intervalo relativamente pequeno de funcionamento da linha, atingindo valores muito próximos à zero em 8,4 dias de operação. Isso reflete diretamente na disponibilidade da linha e nos custos de manutenção corretiva.

Na sequência, cada equipamento da linha de enfardamento teve seus componentes e sistemas modelados no Blocksim. Os dados de vida foram inseridos em cada componente, além dos dados de corretiva e reparo do equipamento em caso de falha.

Figura 4.4 – Modelagem dos equipamentos de enfardamento.

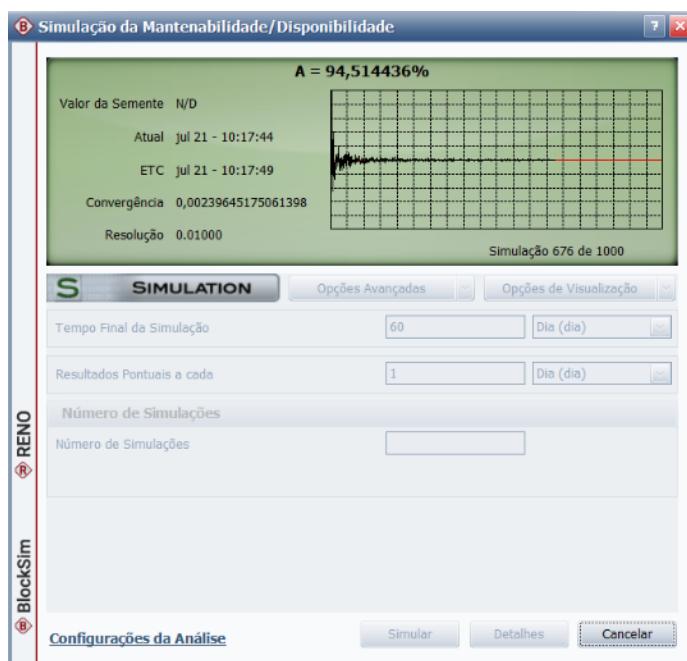


Fonte: o autor (2019).

Com o modelo da linha de enfardamento construído, foi realizada a análise RAM com simulação do diagrama de blocos que contém os dados de TTF e TTR dos equipamentos individualmente, apresentada na figura 4.5.



Figura 4.5 – Simulação de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade.



Fonte: o autor (2019).

Para a simulação, foi considerado um período de 60 dias, que é o tempo alvo para estabelecimento de paradas programadas das linhas de enfiamento. O principal objetivo é verificar a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos e da linha como um todo, buscando tratar os componentes e/ou subsistemas com menor disponibilidade, maior número esperado de falhas e maior quantidade de tempo indisponível por manutenção corretiva, conforme verificado na figura 4.6.

Figura 4.6 – Resultado da simulação de disponibilidade, manutenibilidade e confiabilidade da linha de enfardamento.

Resumo Individual do Bloco						
Nome do Bloco	Disp. Média (Todos Eventos)	# Esperado Falhas	Tempo Indisponível do Bloco (h)	Tempo Disponível do Bloco (h)	Quantidade de MCs	Tempo Indisponível da MC (h)
PF - Cilindro Hidr.	0,995469	1,09	6,525042	1433,474958	1,09	6,525042
Unit. - Cj. Cilindros Hidr.	0,996073	0,944	5,654614	1434,345386	0,944	5,654614
PF - Tubulações	0,996113	1,6	5,59672	1434,40328	1,6	5,59672
Unit. - Unidade de Torção	0,996472	1,453	5,080557	1434,919443	1,453	5,080557
1 Am - Cj. Sequência	0,996703	1,899	4,7475	1435,2525	1,899	4,7475
PF - Cj. Bombas Hidr.	0,996716	0,947	4,728586	1435,271414	0,947	4,728586
Emp. - Alinhador Fardos	0,997067	0,845	4,22372	1435,77628	0,845	4,22372
Impr. - Cabeçote	0,997172	2,037	4,072084	1435,927916	2,037	4,072084
Encap. - Sist. Dobra	0,997539	0,886	3,544	1436,456	0,886	3,544
Dobr. - Cilindro Hidr.	0,997558	1,173	3,515849	1436,484151	1,173	3,515849
Encap. - Sist. Alim. Capa	0,997793	0,91	3,178037	1436,821963	0,91	3,178037
Dobr. - Mesa de Giro	0,998019	0,713	2,852	1437,148	0,713	2,852
Encap. - Sist. Vácuo	0,998481	1,094	2,188	1437,812	1,094	2,188
Tr Transl. - Cabo Gula	0,998739	0,521	1,815359	1438,184641	0,521	1,815359
PF - Barreira de Luz	0,998741	0,726	1,812906	1438,187094	0,726	1,812906
Encap. - Cj. Cilindros Pneum.	0,999019	0,565	1,4125	1438,5875	0,565	1,4125
Tr Giro - Cabeamento Elétrico	0,999073	0,445	1,335	1438,665	0,445	1,335
1 Am - Unidade de Torção	0,999128	0,42	1,255349	1438,744651	0,42	1,255349
Emp. - Transportador	0,999153	0,611	1,219197	1438,780803	0,611	1,219197
Encap. - Motor Eletr.	0,999227	1,114	1,11241	1438,88759	1,114	1,11241
Tr Transl. - Cj. Sensores	0,999241	0,729	1,0935	1438,9065	0,729	1,0935
PF - Sist. Vedação	0,999303	0,402	1,003487	1438,996513	0,402	1,003487
PF - Transp. Correia	0,999311	0,663	0,992572	1439,007428	0,663	0,992572
Unit. - Alavanca de Armação	0,999324	0,649	0,9735	1439,0265	0,649	0,9735
1 Am - Cj. Alimentação Arame	0,999337	0,382	0,955	1439,045	0,382	0,955
Emp. - Bomba Hidr.	0,999374	0,259	0,901408	1439,098592	0,259	0,901408
Emp. - Cilindro Hidr.	0,9994	0,216	0,864	1439,136	0,216	0,864

Fonte: o autor (2019).

Analisando os dados, foram tomados os itens destacados em vermelho na figura 4.6 para avaliação do comportamento da taxa de falhas em função do tempo. Foi tomado como limite de corte as falhas que param a linha por mais de 1,0h, totalizando 22 componentes e subsistemas analisados.

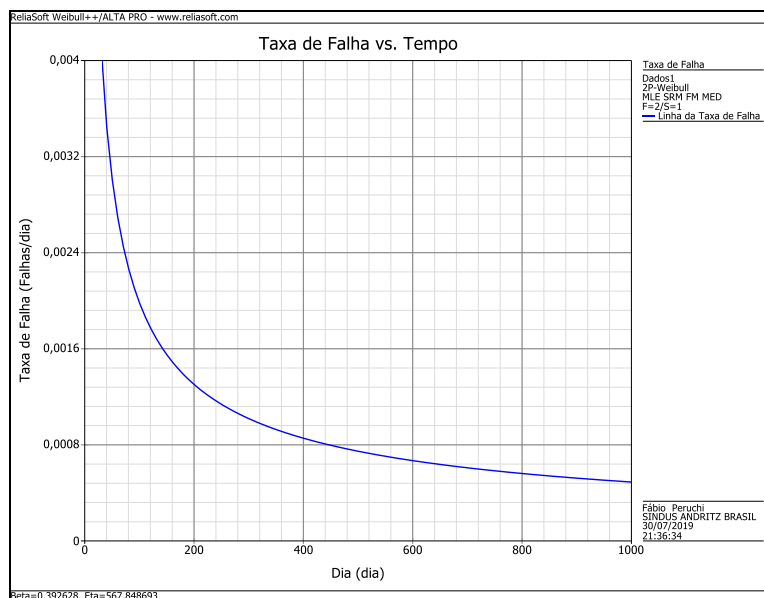
O comportamento do fator de forma  $\beta$  da distribuição Weibull foi tomado para indicar o tipo de evento de falha, considerando sendo  $\beta < 1$  “premature”,  $\beta = 1$  “aleatório” e  $\beta > 1$  “fim de vida”. Com base nessa informação é feito o direcionamento para análise e aprofundamento das causas básicas. Subsistemas ou componentes com  $\beta \leq 1$  foram analisados utilizando-se a ferramenta FTA. Para itens com  $\beta > 1$ , será feita abordagem com plano de manutenção preventiva.

#### 4.1 TRANSPORTADOR DE GIRO

O componente do transportador de giro que teve seus modos de falha analisados em função do tempo indisponível é o conjunto de cabeamento elétrico.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do conjunto de cabeamento elétrico é exibido no gráfico 4.2.

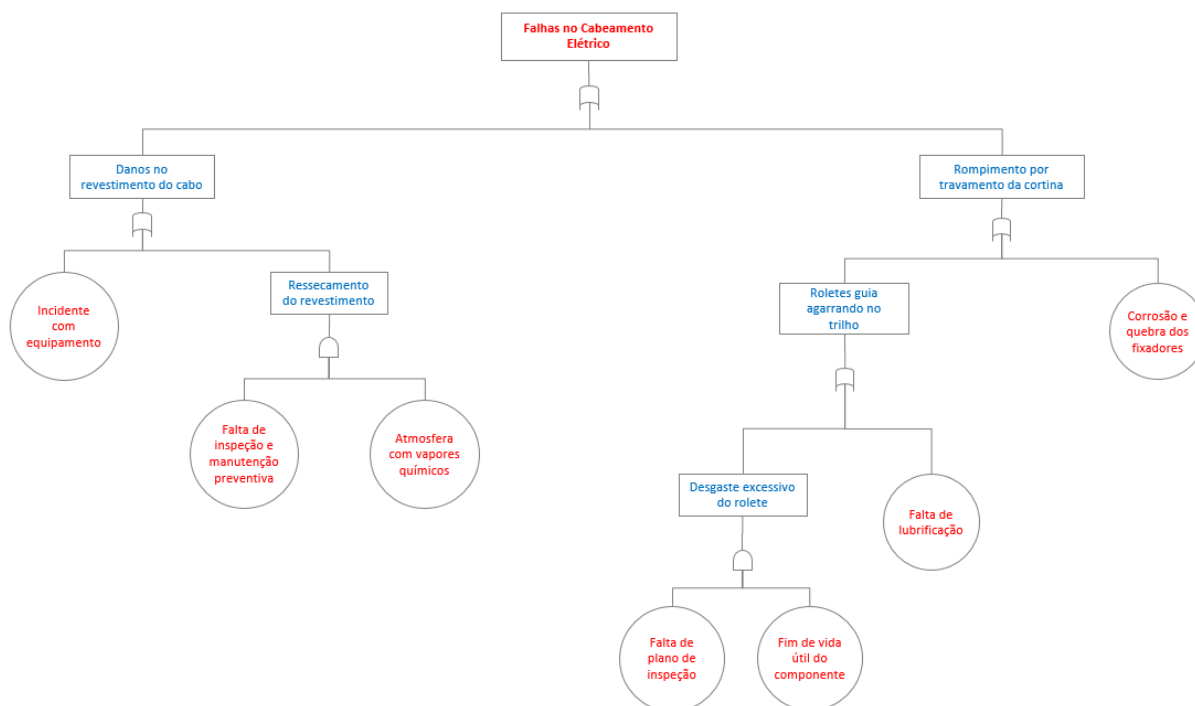
Gráfico 4.2 – Taxa de falhas do cabeamento elétrico



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.2, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.7.

Figura 4.7 – FTA falhas em cabos elétricos



Fonte: o autor (2019).

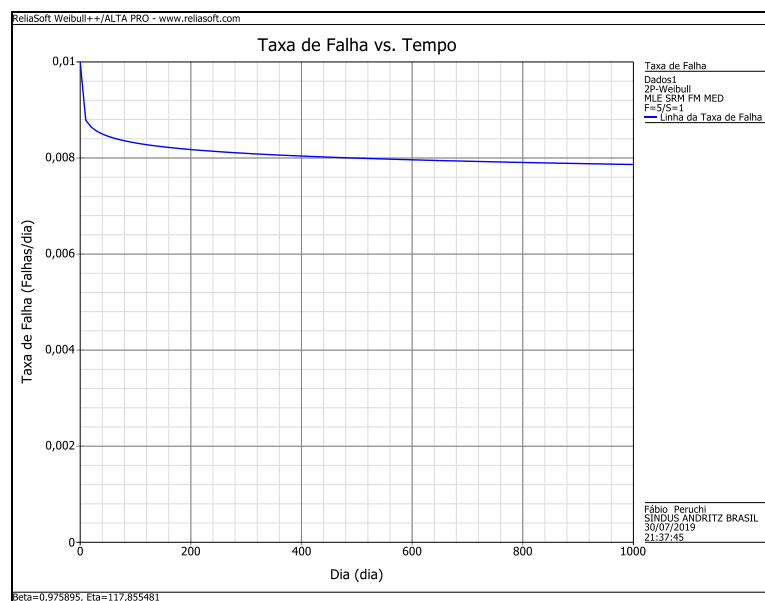
Conforme verificado na figura 4.7, as ações de bloqueio estão voltadas basicamente para rotinas de inspeção e lubrificação. Existem casos em que ocorrem danos aos cabos durante as intervenções de manutenção, o que irá demandar treinamento e conscientização da equipe.

## 4.2 TRANSPORTADOR DE TRANSLAÇÃO

As falhas analisadas no transportador de translação são associadas ao cabo guia e conjunto de sensores.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do cabo guia é apresentado no gráfico 4.3.

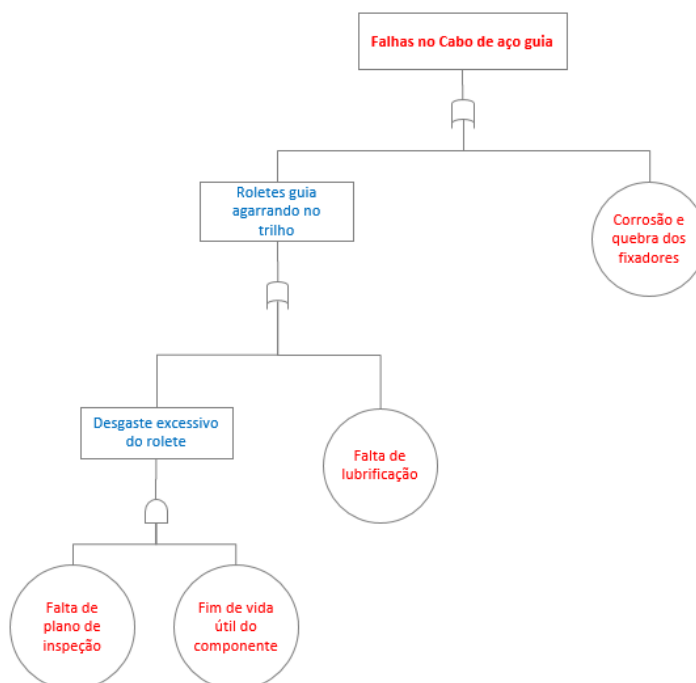
Gráfico 4.3 – Taxa de falhas do cabo guia



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.3, a taxa de falhas é decrescente e encontra-se muito próxima ao comportamento aleatório (porção central da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.8.

Figura 4.8 – FTA falhas no cabo guia

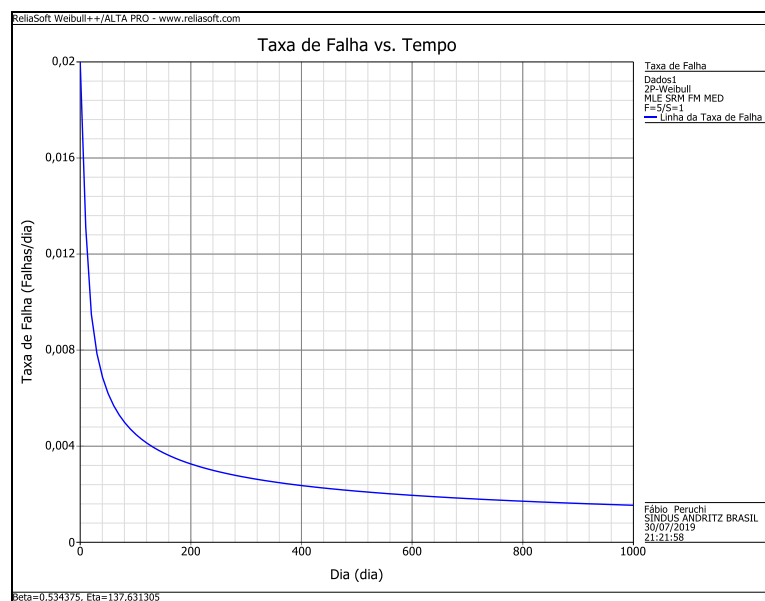


Fonte: o autor (2019).

Conforme apresentado na figura 4.8, as causas básicas das falhas no cabo guia estão associadas ao desgaste, travamento dos roletes e corrosão de fixadores.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do conjunto de sensores é exibido no gráfico 4.4.

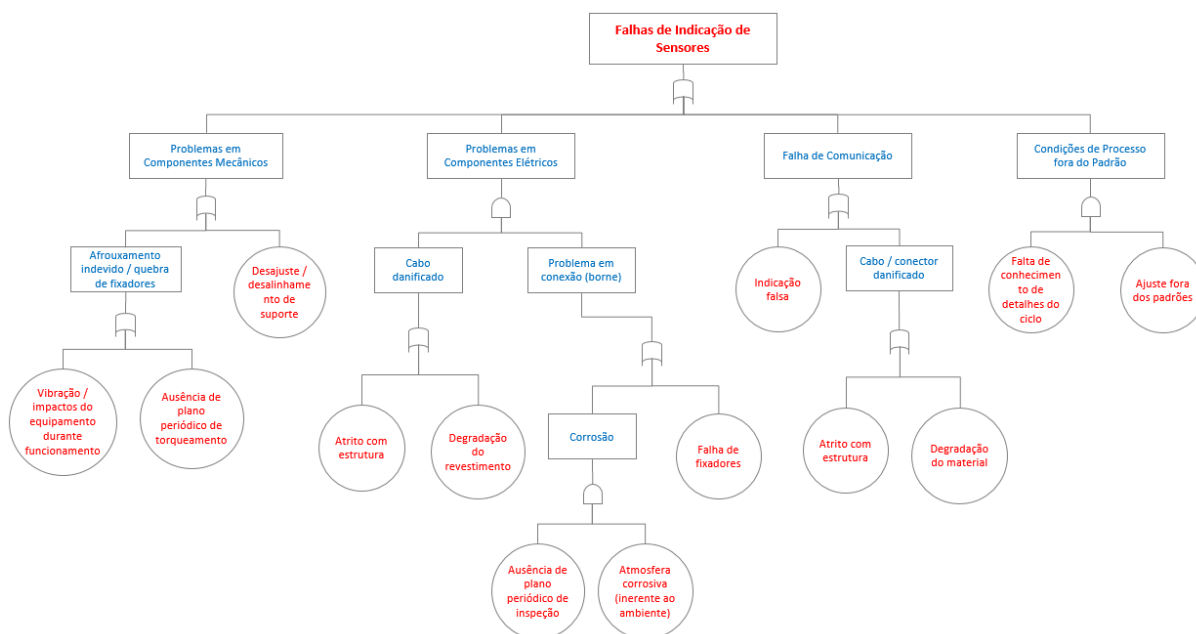
Gráfico 4.4 – Taxa de falhas do conjunto de sensores



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.4, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.9.

Figura 4.9 – FTA falhas no conjunto de sensores



Fonte: o autor (2019).

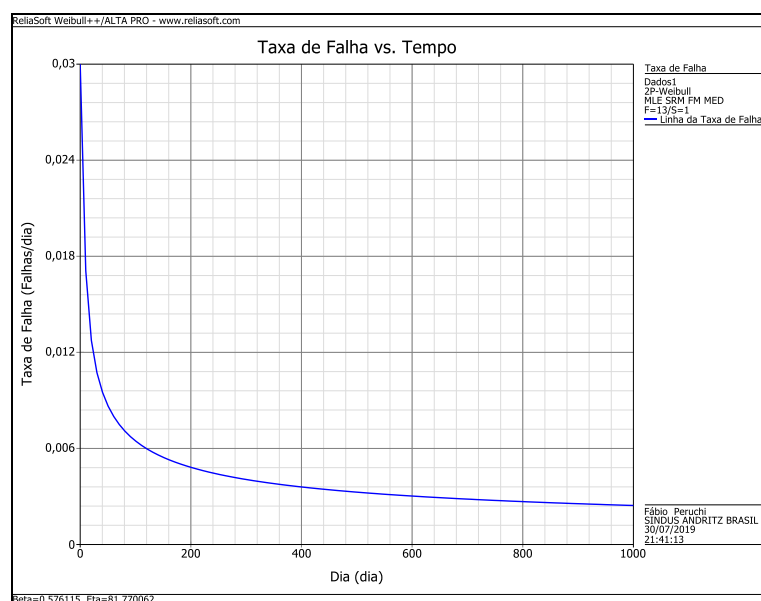
Conforme verificado na figura 4.9, as falhas do conjunto de sensores têm associação principalmente com afrouxamento de fixadores, contato direto com as estruturas móveis e ajustes fora de posição, realizados pelos operadores e equipe de manutenção.

### 4.3 PRENSA DE FARDOS

A prensa de fardos, por ser um equipamento de maior complexidade, possui falhas associadas ao conjunto hidráulico (bombas, cilindros hidráulicos, vedações e tubulações), além do sistema de barreira de luz.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do conjunto de bombas hidráulicas é mostrado no gráfico 4.5.

Gráfico 4.5 – Taxa de falhas do conjunto de bombas hidráulicas

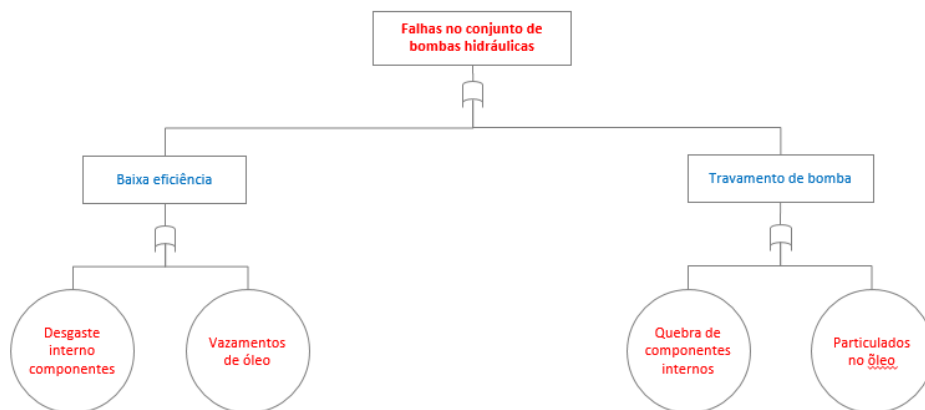


Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.5, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.10.



Figura 4.10 – FTA falhas no conjunto de bombas hidráulicas

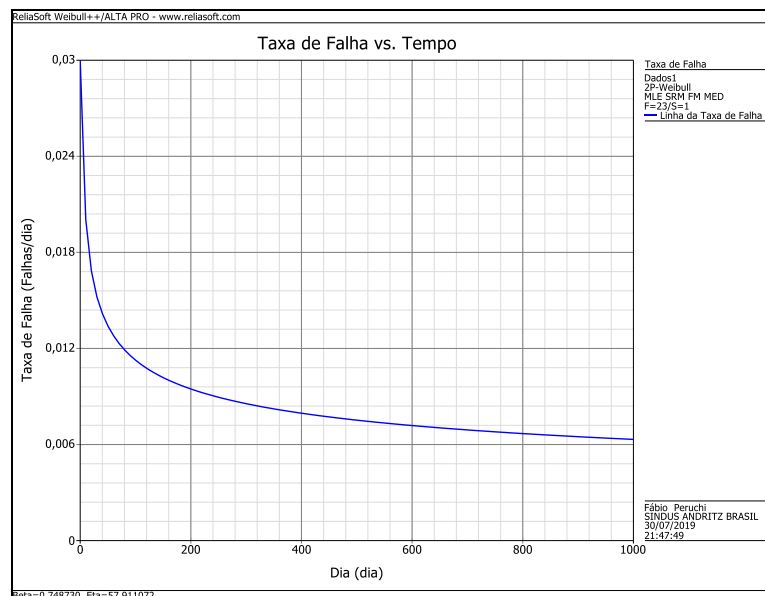


Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado na figura 4.10, as falhas do sistema de bombeamento, segundo histórico analisado, se dão devido à fim de vida útil de componentes, falhas em vedações e sistema de filtragem.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do conjunto de cilindros hidráulicos é mostrado no gráfico 4.6.

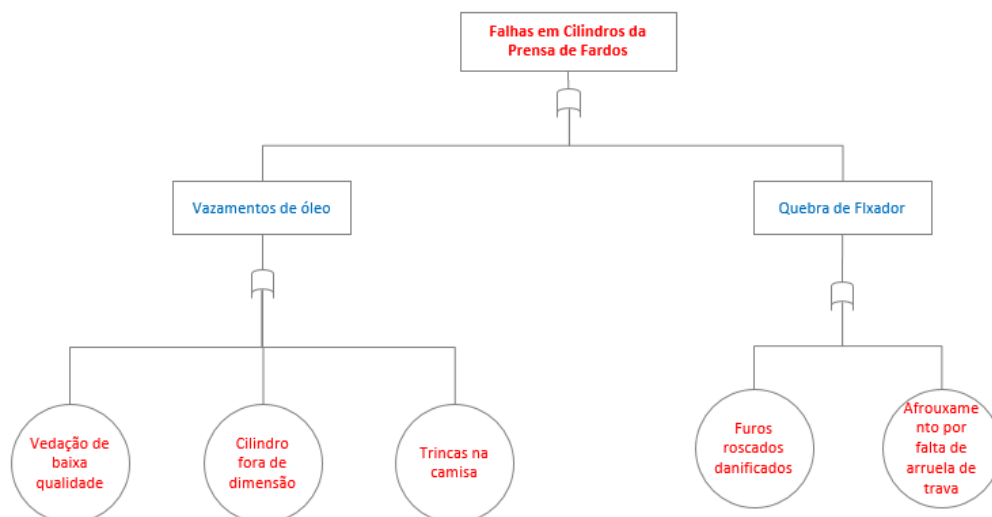
Gráfico 4.6 – Taxa de falhas do conjunto de cilindros hidráulicos



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.6, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.11.

Figura 4.11 – FTA falhas no conjunto de cilindros hidráulicos

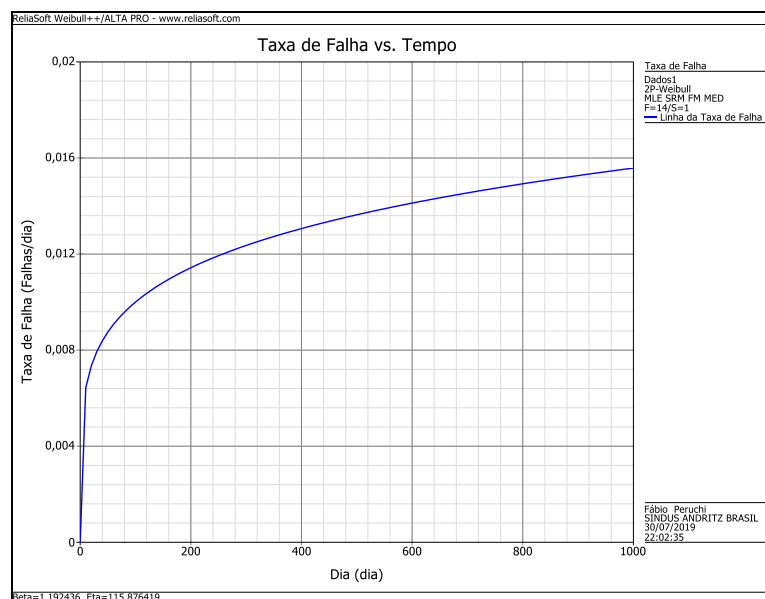


Fonte: o autor (2019).

Conforme observado na figura 4.11, as falhas dos cilindros da prensa estão fortemente associadas à reparo realizado em fornecedores externos e ao desprendimento de fixadores da haste.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do conjunto de vedações é mostrado no gráfico 4.7.

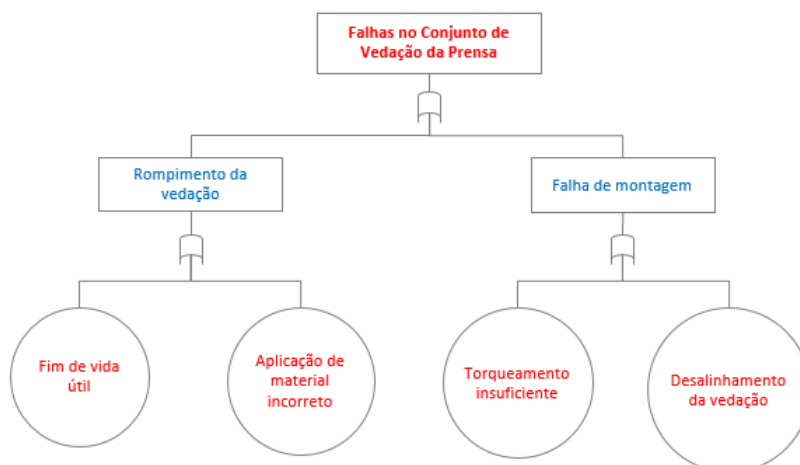
Gráfico 4.7 – Taxa de falhas do conjunto de vedações



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.7, a taxa de falhas é crescente em função do tempo. O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.12.

Figura 4.12 – FTA falhas no conjunto de vedações da prensa

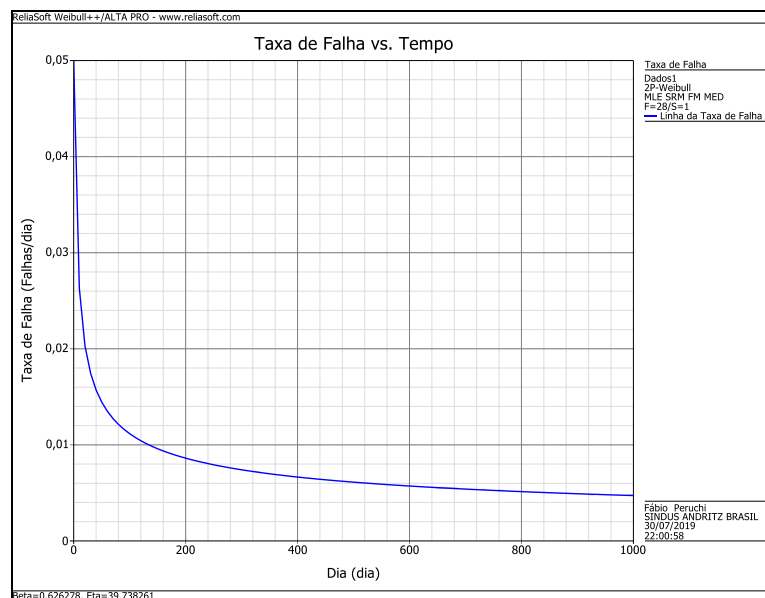


Fonte: o autor (2019).

Conforme observado na figura 4.12, as falhas do conjunto de vedação da prensa estão associadas à deterioração do elemento vedante e problemas de montagem.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do conjunto de tubulações é exibido no gráfico 4.8.

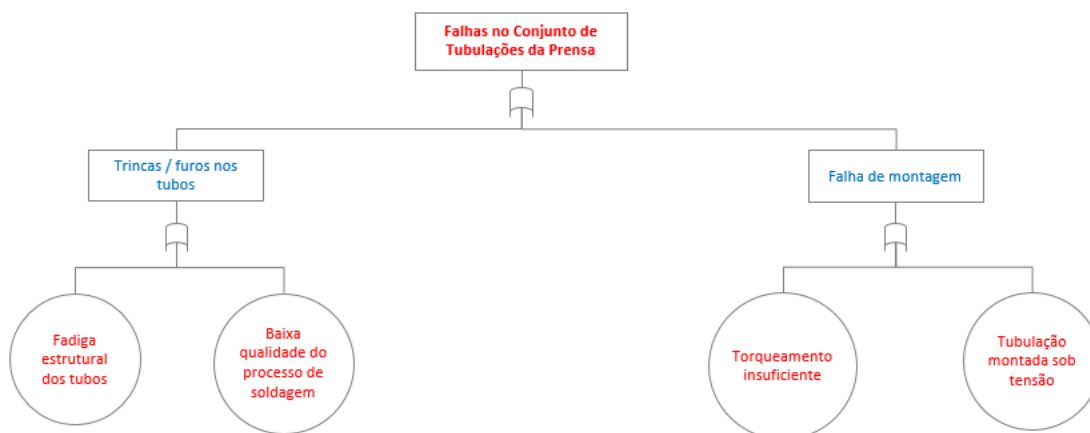
Gráfico 4.8 – Taxa de falhas do conjunto de tubulações



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.8, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.13.

Figura 4.13 – FTA falhas no conjunto de tubulações da prensa

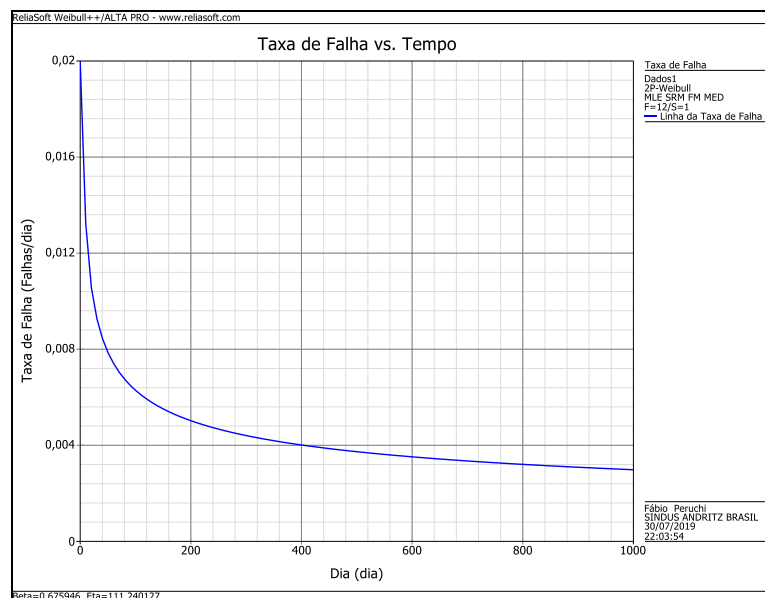


Fonte: o autor (2019).

Conforme observado na figura 4.13, as falhas do conjunto de tubulações estão fortemente associadas à trincas e furos nos tubos e falhas de montagem.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo da barreira de luz é exibido no gráfico 4.9.

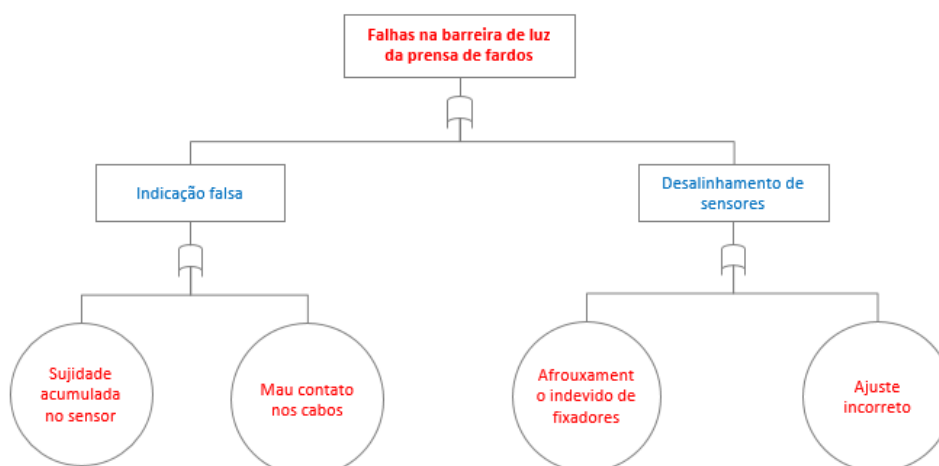
Gráfico 4.9 – Taxa de falhas da barreira de luz



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.9, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.14.

Figura 4.14 – FTA falhas na barreira de luz



Fonte: o autor (2019).

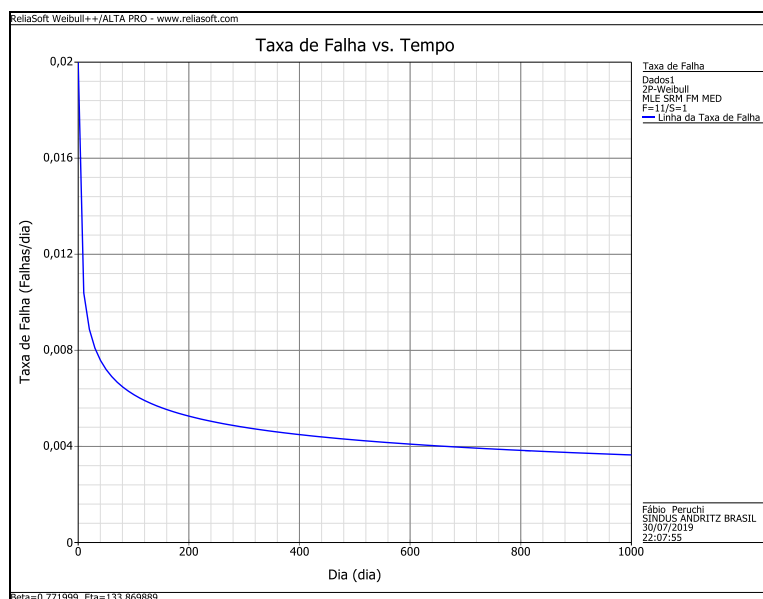
Conforme observado na figura 4.14, as falhas na barreira de luz estão associadas à problemas de sinal (sujidade e mau contato de cabos) e desalinhamento dos sensores.

#### 4.4 ENCAPADEIRA

Existem 05 subsistemas/componentes das encapadeiras que contribuem fortemente para a indisponibilidade do equipamento e por consequência do sistema: conjunto de cilindros pneumáticos, motor elétrico, sistema de alimentação de capas, sistema de dobra e sistema de vácuo.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do conjunto de cilindros pneumáticos é exibido no gráfico 4.10.

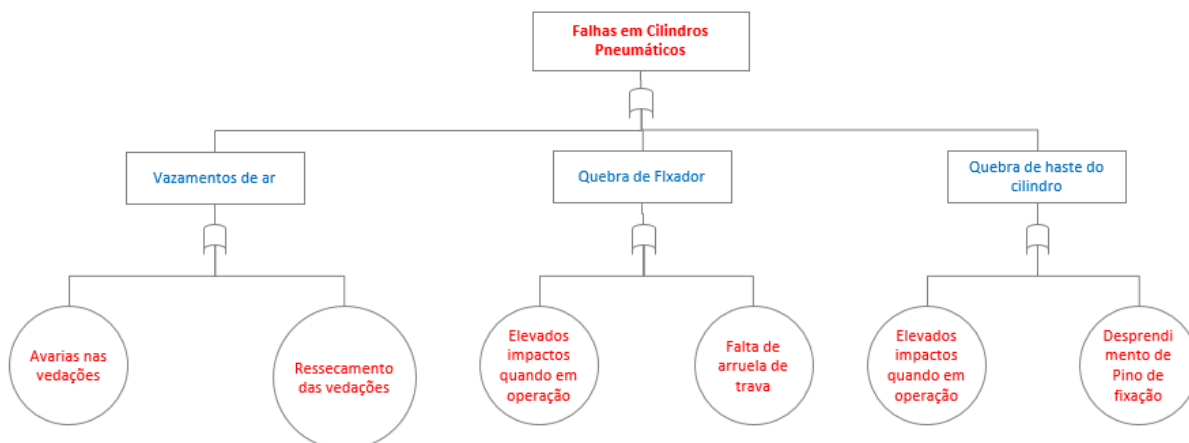
Gráfico 4.10 – Taxa de falha dos cilindros pneumáticos



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.10, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.15.

Figura 4.15 – FTA falhas em cilindros pneumáticos

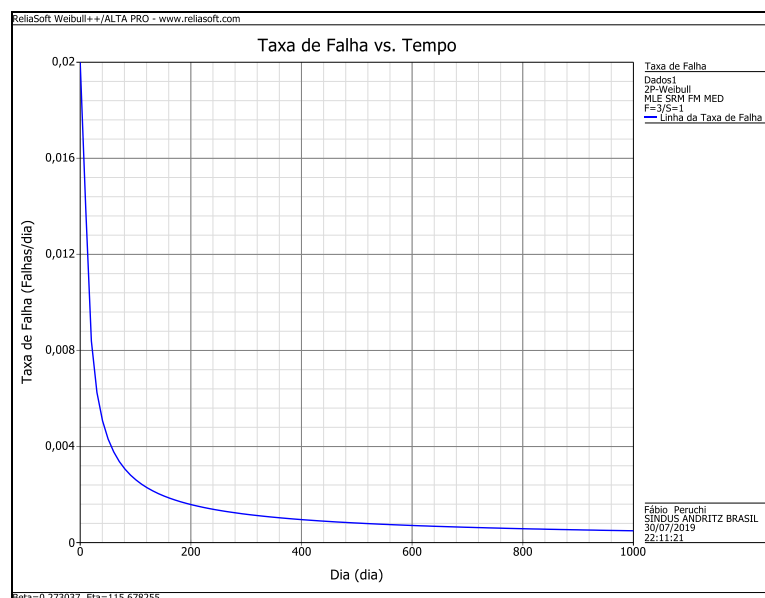


Fonte: o autor (2019).

Conforme observado na figura 4.15, os eventos de parada originados por falhas em cilindros pneumáticos das encapadeiras estão fortemente associados à elevados impactos quando em operação devido à ajuste incorreto de vazão.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo dos motores elétricos é exibido no gráfico 4.11.

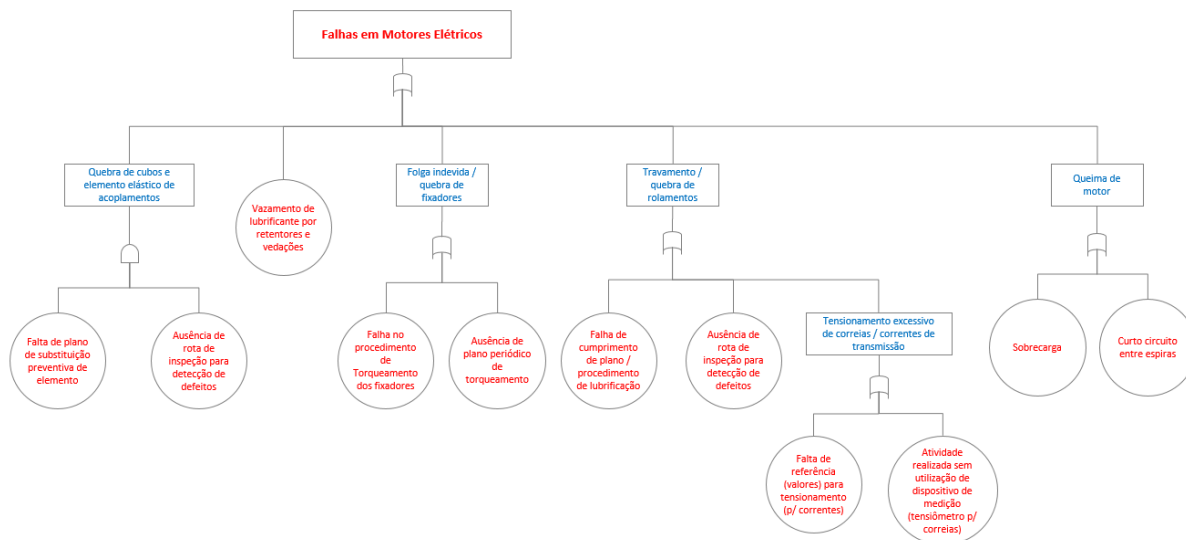
Gráfico 4.11 – Taxa de falhas do motor elétrico



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.11, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.16.

Figura 4.16 – FTA falhas do motor elétrico



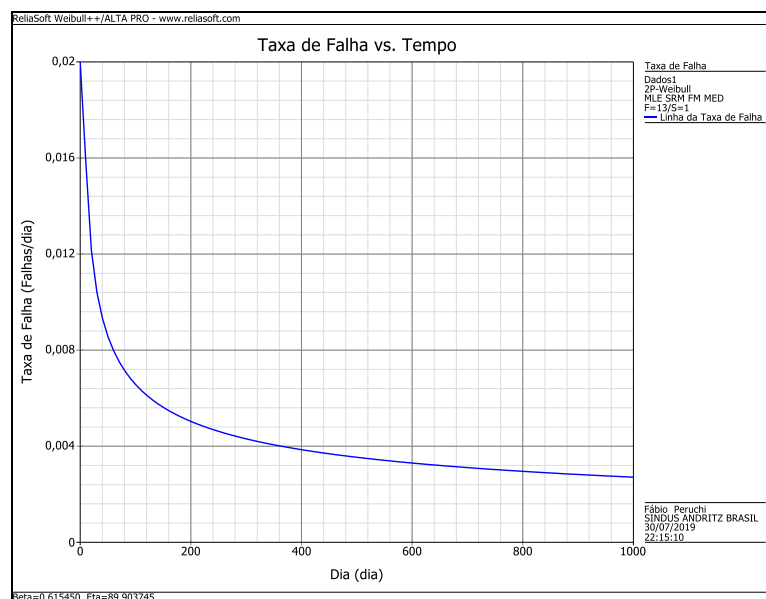
Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado na figura 4.16, as falhas de motores das encapadeiras estão associadas à desarmes em consequência de falhas de fixação.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do sistema de alimentação de capas é mostrado no gráfico 4.12.



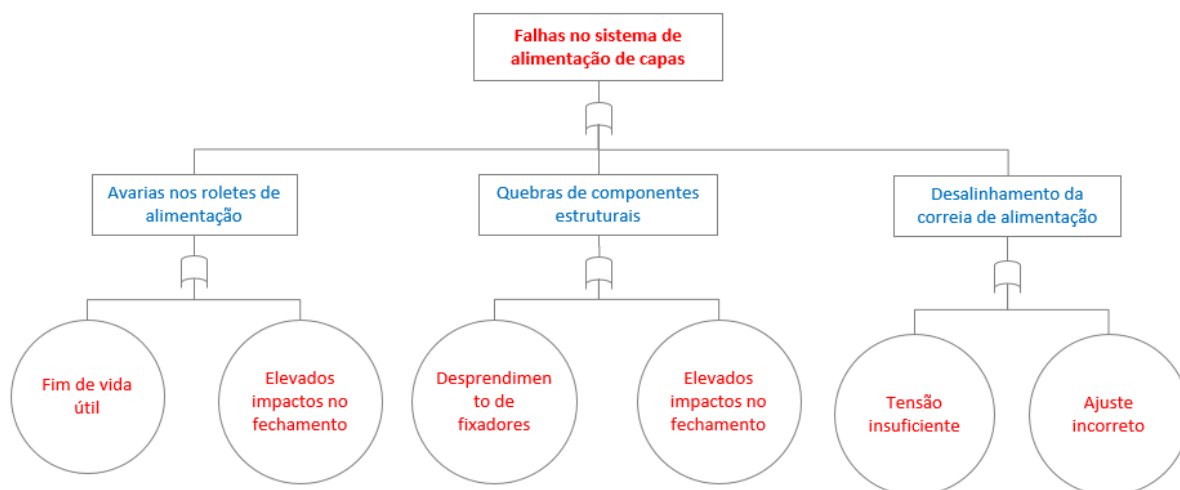
Gráfico 4.12 – Taxa de falhas do sistema de alimentação de capas



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.12, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.17.

Figura 4.17 – FTA falhas sistema de alimentação de capas

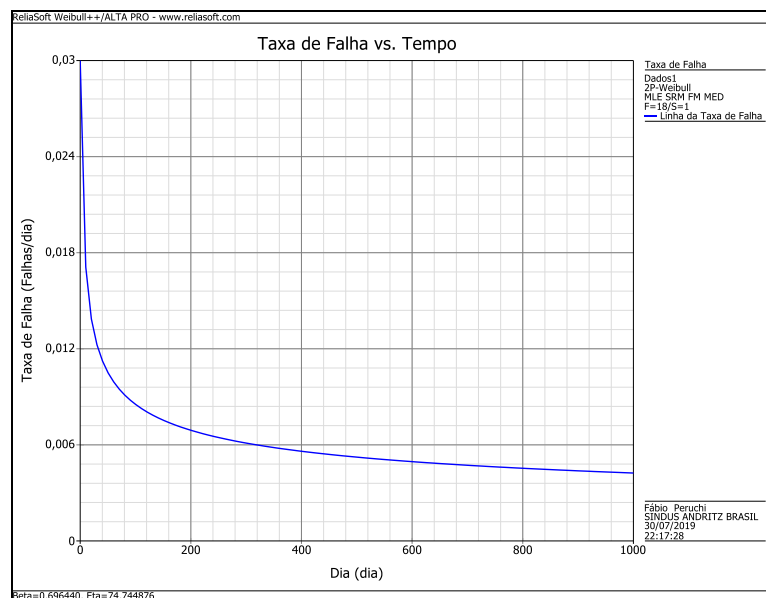


Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado na figura 4.17, as falhas do sistema de alimentação das encapadeiras tem forte associação com elevados impactos durante a operação devido à ajustes incorretos de vazão.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do sistema de dobra de capas é exibido no gráfico 4.13.

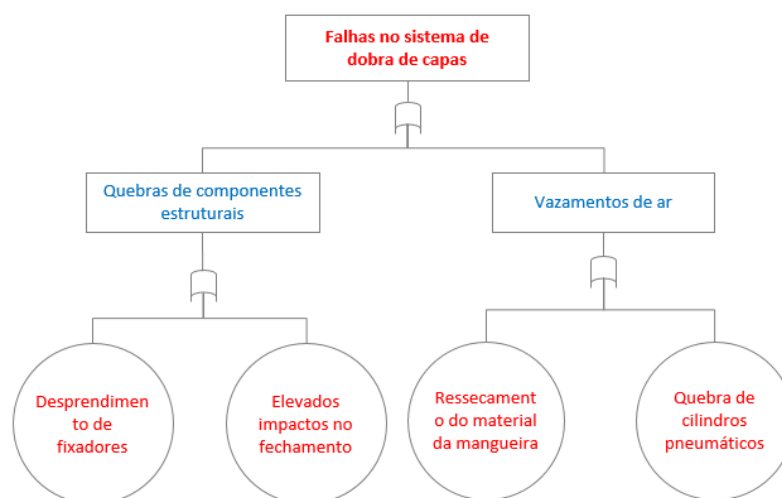
Gráfico 4.13 – Taxa de falhas do sistema de dobra de capas



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.13, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.18.

Figura 4.18 – FTA falhas sistema de dobra de capas

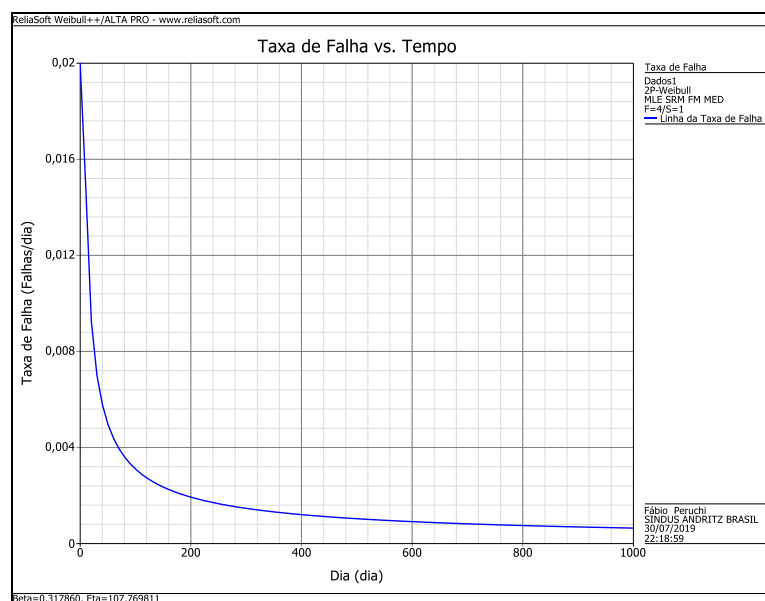


Fonte: o autor (2019).

Conforme observado na figura 4.18, assim como no sistema de alimentação de capas, as falhas do sistema de dobra das encapadeiras tem forte associação com elevados impactos durante a operação devido à ajustes incorretos de vazão.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do sistema de vácuo é apresentado no gráfico 4.14.

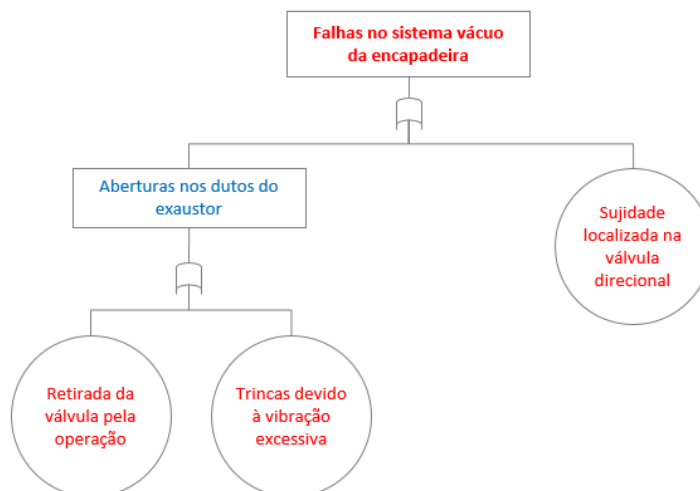
Gráfico 4.14 – Taxa de falhas do sistema de vácuo



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.14, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.19.

Figura 4.19 – FTA falhas no sistema de vácuo



Fonte: o autor (2019).

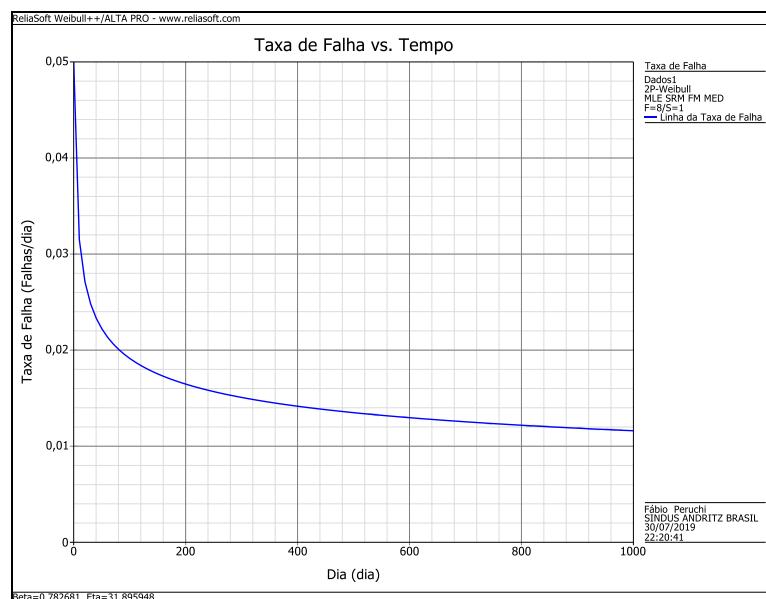
Conforme observado na figura 4.19, as falhas do sistema de vácuo estão associadas à entrada de ar no sistema através de furo nos dutos de exaustão e sujidade que resulta em travamento da válvula direcional.

#### 4.5 AMARRADEIRA 1ª POSIÇÃO

As falhas na amarradeira da 1ª posição se concentram no conjunto de sequência de amarração e na unidade de torção.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do conjunto de sequência é exibido no gráfico 4.15.

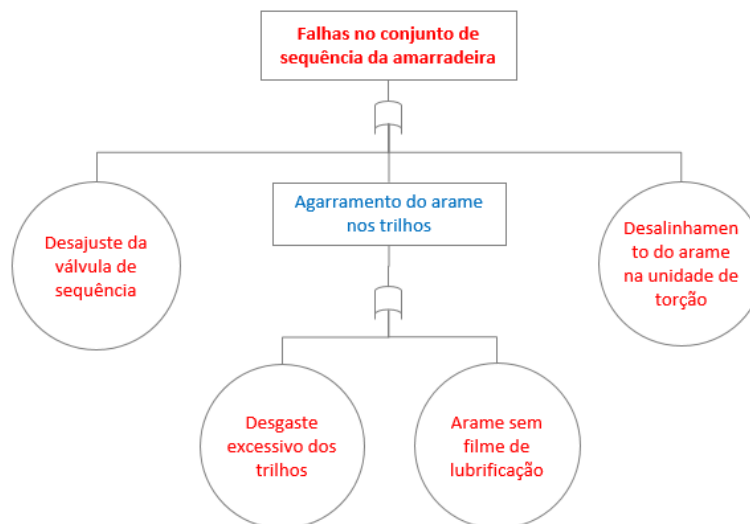
Gráfico 4.15 – Taxa de falhas do conjunto de seqüência



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.15, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.20.

Figura 4.20 – FTA Conjunto de seqüência

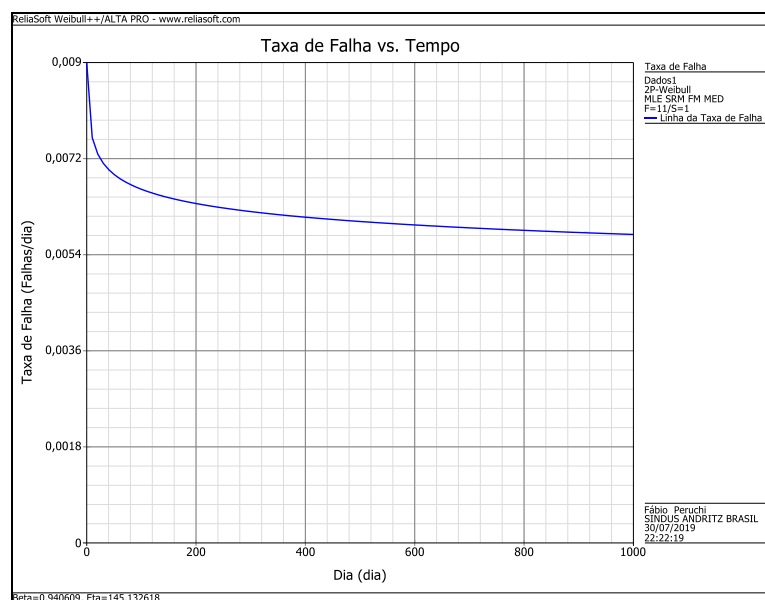


Fonte: o autor (2019).

Conforme observado na figura 4.20, as falhas no conjunto de seqüência estão fortemente associadas à desajuste da válvula de seqüência e agarramento/desalinhamento do arame nos trilhos.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo da unidade de torção é mostrado no gráfico 4.16.

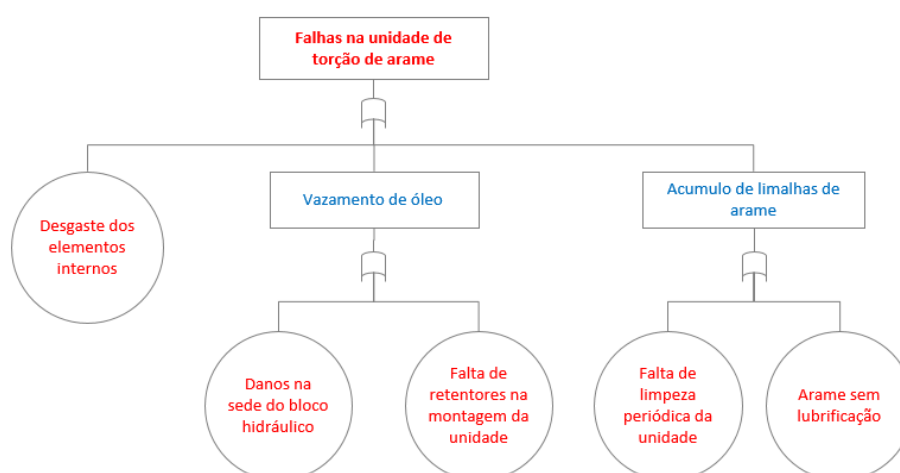
Gráfico 4.16 – Taxa de falhas da unidade de torção



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.16, a taxa de falhas é decrescente e encontra-se muito próxima ao comportamento aleatório (porção central da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.21.

Figura 4.21 – FTA Unidade de torção



Fonte: o autor (2019).

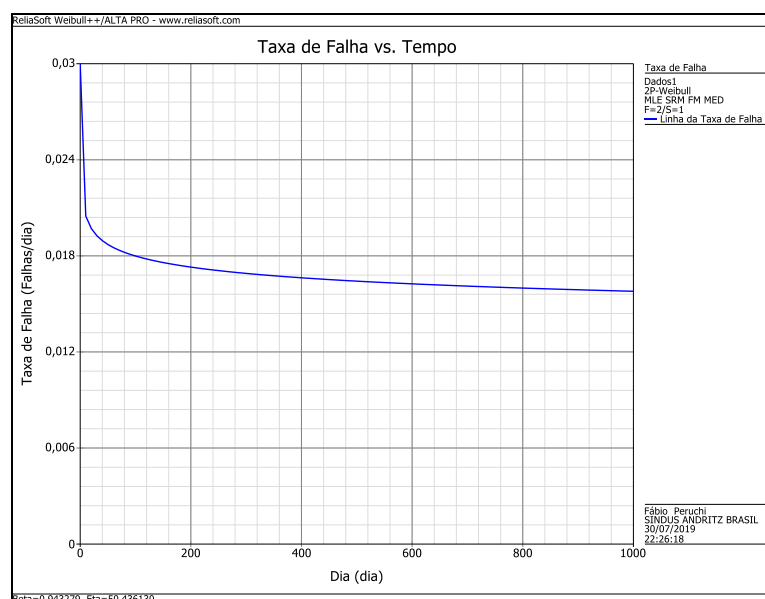
Conforme observado na figura 4.21, as falhas da unidade de torção estão fortemente associadas à desgaste de elementos internos, vazamento de óleo e presença de limalhas de arame no interior da unidade.

#### 4.6 DOBRADEIRA

Os componentes de maior contribuição na indisponibilidade da dobradeira são o conjunto de cilindros hidráulicos e a mesa de giro de fardos.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do conjunto de cilindros hidráulicos é exibido no gráfico 4.17.

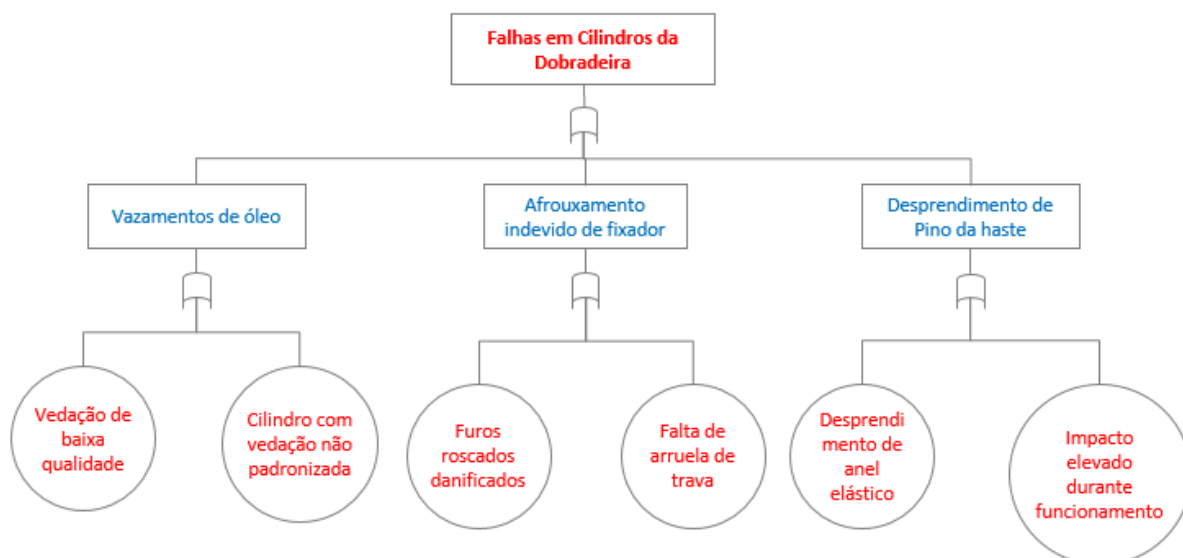
Gráfico 4.17 – Taxa de falhas do conjunto de cilindros hidráulicos



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.17, a taxa de falhas é decrescente e encontra-se muito próxima ao comportamento aleatório (porção central da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.22.

Figura 4.22 – FTA Conjunto de cilindros hidráulicos

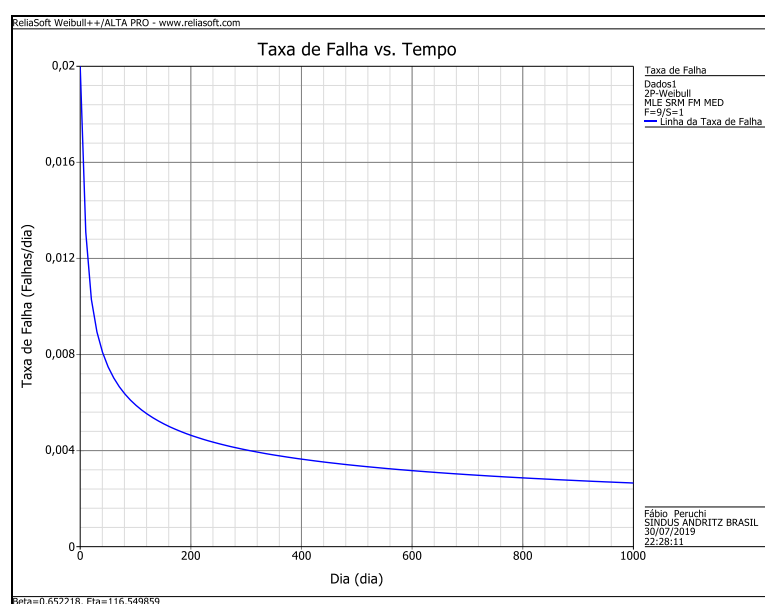


Fonte: o autor (2019).

Conforme observado na figura 4.22, as falhas associadas à cilindros da dobradeira estão associadas à vazamentos de óleo e desprendimento/quebra de fixadores.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo da mesa de giro da dobradeira é mostrado no gráfico 4.18.

Gráfico 4.18 – Taxa de falhas da mesa de giro

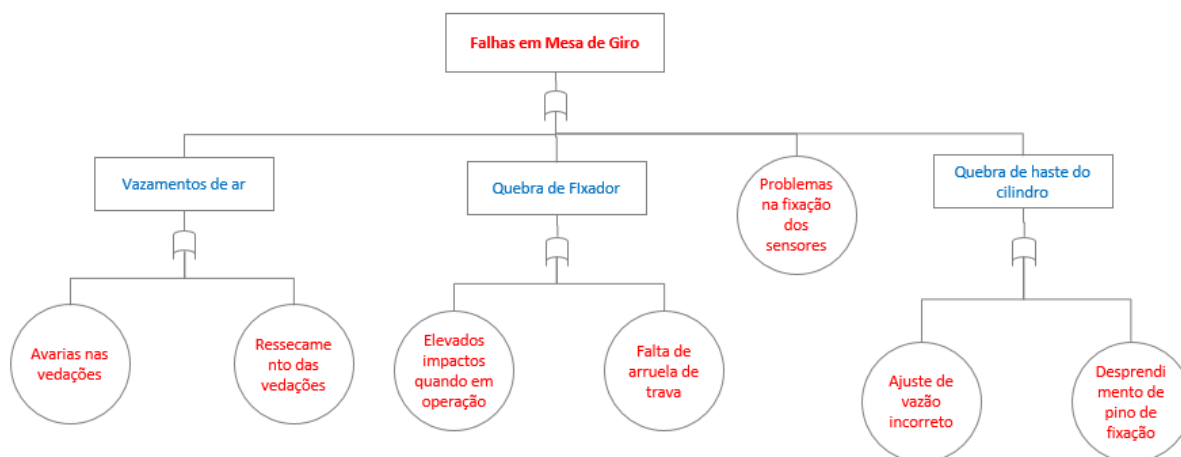


Fonte: o autor (2019).



Conforme verificado no gráfico 4.18, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.23.

Figura 4.23 – FTA Mesa de Giro



Fonte: o autor (2019).

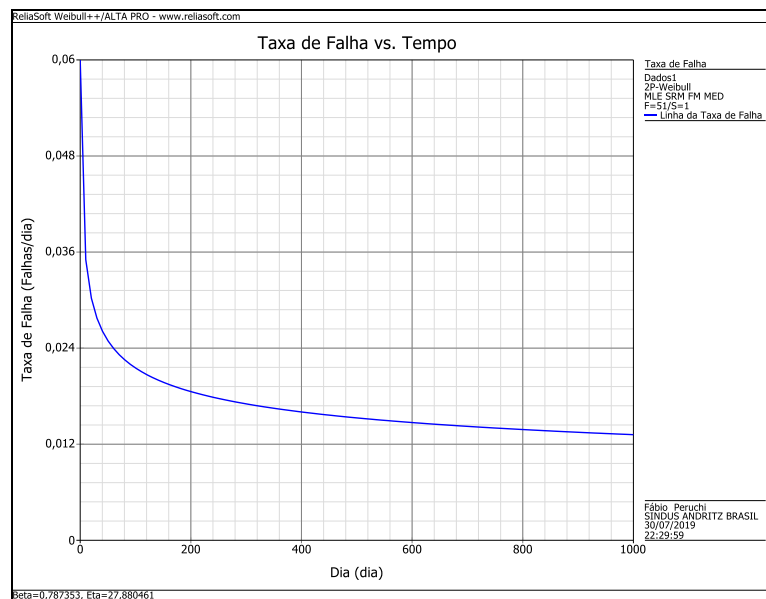
Conforme observado na figura 4.23, as falhas associadas à mesa de giro da dobradeira estão associadas à vazamentos de ar, quebra de fixadores e falhas de indicação de sensores.

#### 4.7 IMPRESSORA DE LOGOMARCA

As falhas da impressora estão diretamente ligadas a falhas do cabeçote de impressão.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do cabeçote de impressão é mostrado no gráfico 4.19.

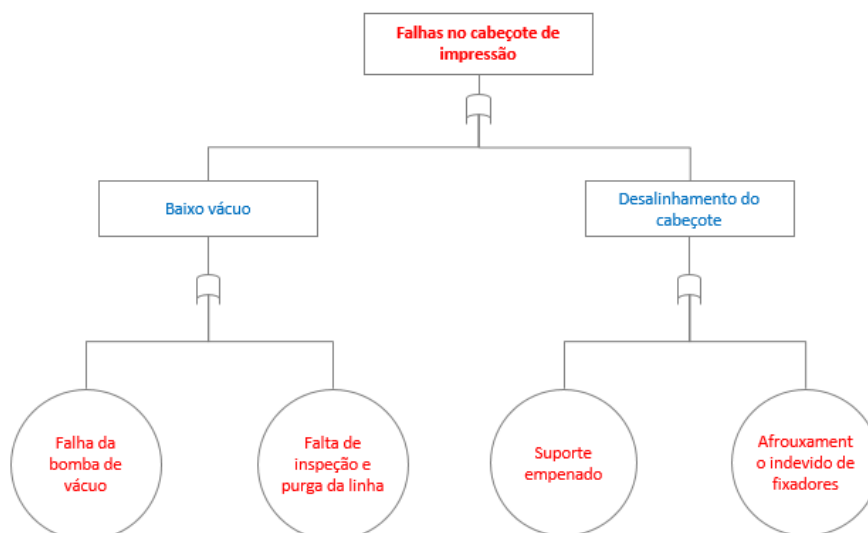
Gráfico 4.19 – Taxa de falhas do cabeçote de impressão



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.19, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.24.

Figura 4.24 – FTA Cabeçote de impressão



Fonte: o autor (2019).

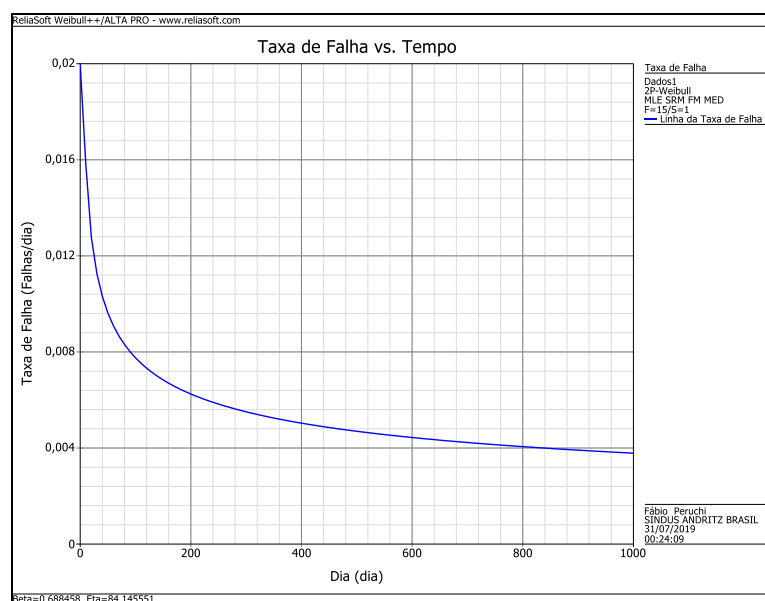
Conforme observado na figura 4.24, as falhas do cabeçote de impressão estão diretamente ligadas a falhas da bomba de vácuo, desalinhamento do cabeçote e falta de purga na linha.

#### 4.8 EMPILHADOR DE FARDOS

Os problemas no empilhador de fardos estão associados ao alinhador do empilhador e ao transportador.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do alinhador de fardos do empilhador é exibido no gráfico 4.20.

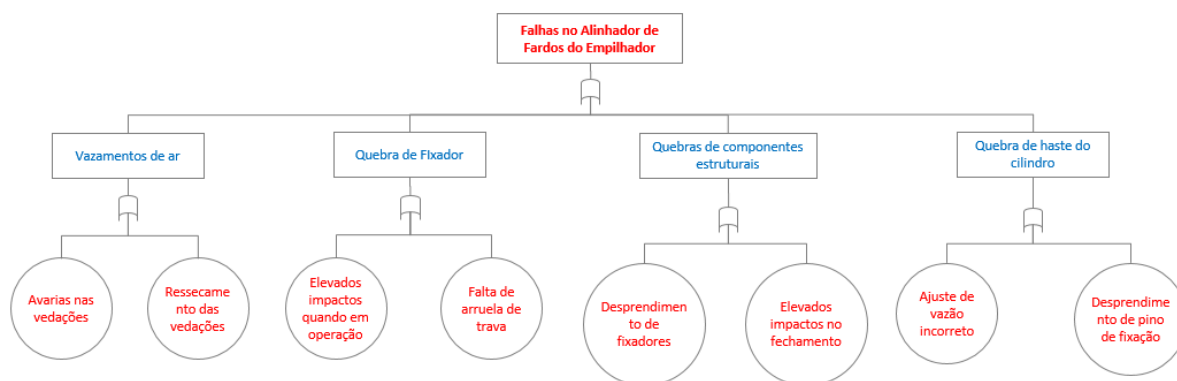
Gráfico 4.20 – Taxa de falhas do alinhador de fardos



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.20, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.25.

Figura 4.25 – FTA Alinhador de fardos

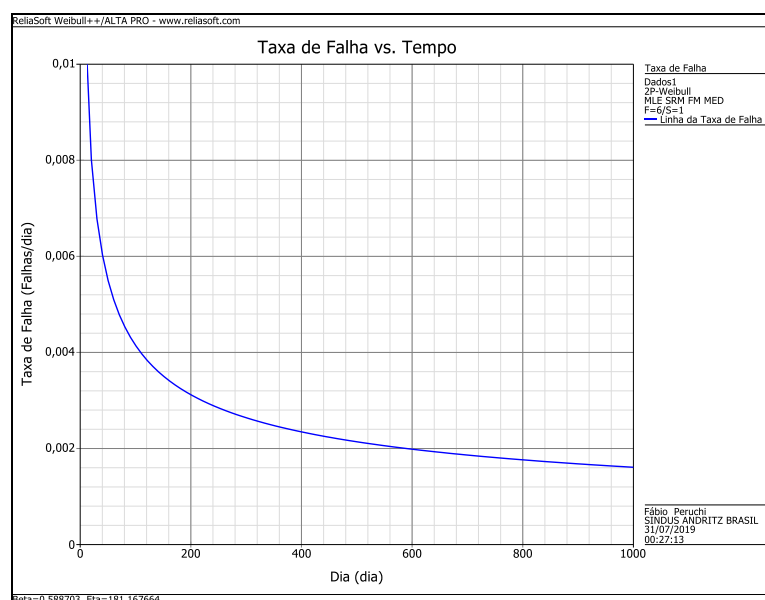


Fonte: o autor (2019).

Conforme observado no gráfico 4.25, as falhas associadas ao alinhador do empilhador ocorrem em grande parte devido à elevados impactos que resultam em quebras de estruturas, fixadores e cilindros.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo do transportador do empilhador é mostrado no gráfico 4.21.

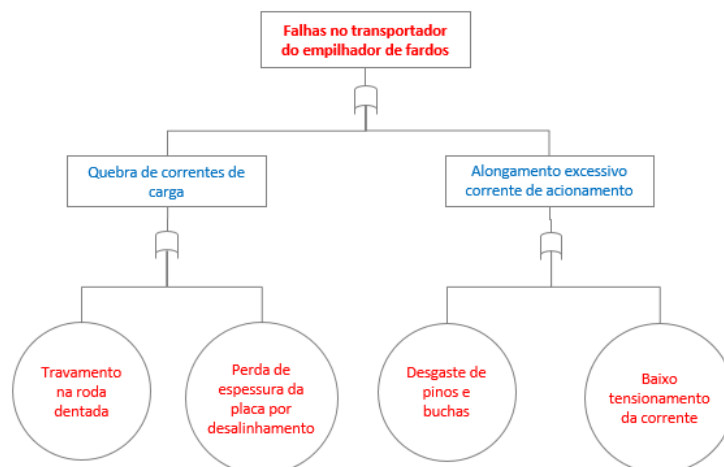
Gráfico 4.21 – Taxa de falhas do transportador do empilhador



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.21, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.26.

Figura 4.26 – FTA Transportador de fardos do empilhador



Fonte: o autor (2019).

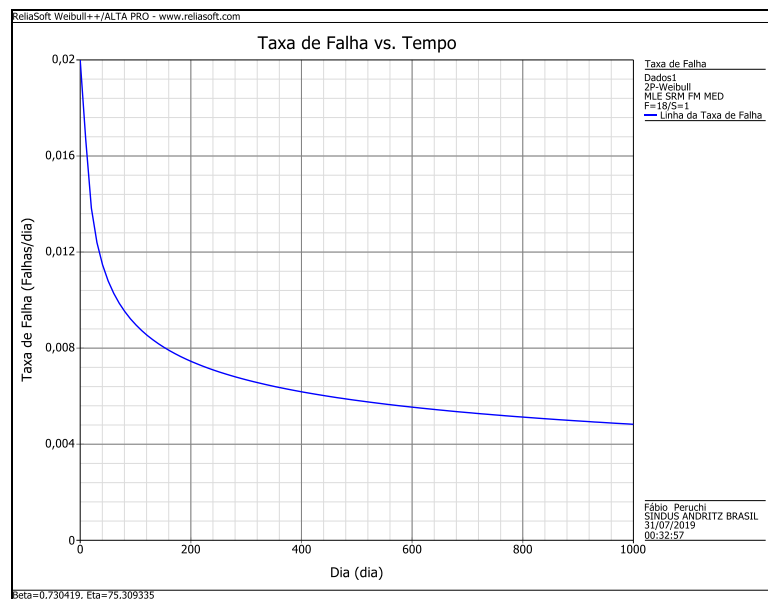
Conforme verificado na figura 4.26, as falhas registradas no transportador do empilhador de fardos remetem diretamente à condição das correntes de carga e acionamento.

#### 4.9 UNITIZADORA DE FARDOS

Os componentes de maior contribuição com o tempo indisponível da unitizadora são o conjunto de cilindros hidráulicos e a unidade de torção.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo dos cilindros hidráulicos da unitizadora é exibido no gráfico 4.22.

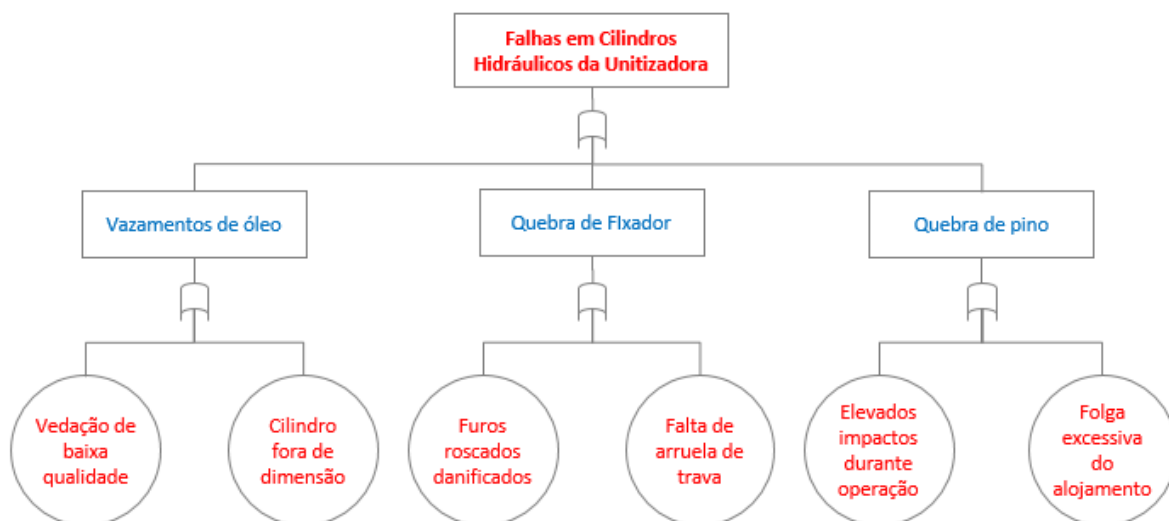
Gráfico 4.22 – Taxa de falhas dos cilindros hidráulicos



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.22, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.27.

Figura 4.27 – FTA Cilindros hidráulicos da unitizadora

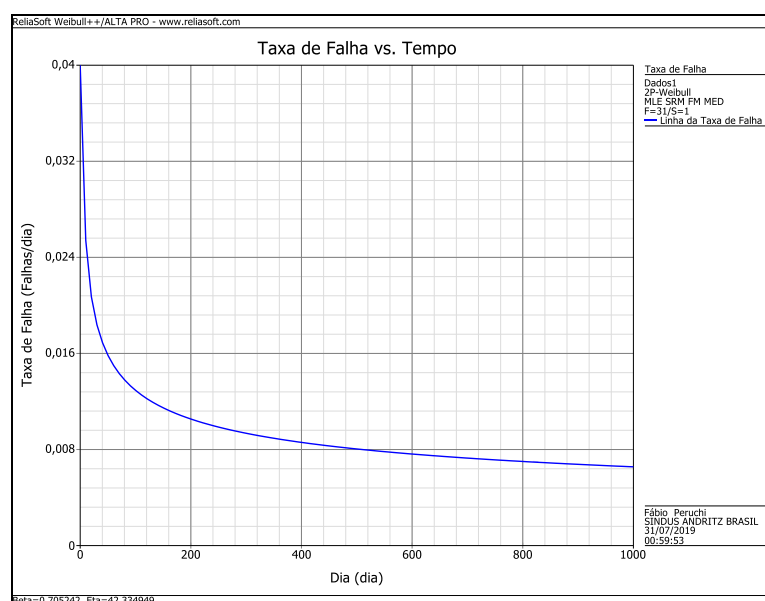


Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado na figura 4.27, as falhas registradas devido à falha de cilindros hidráulicos da unitizadora de fardos remetem diretamente à vazamentos de óleo e quebra de fixadores.

O comportamento da taxa de falhas em função do tempo da unidade de torção da unitizadora é exibido no gráfico 4.23.

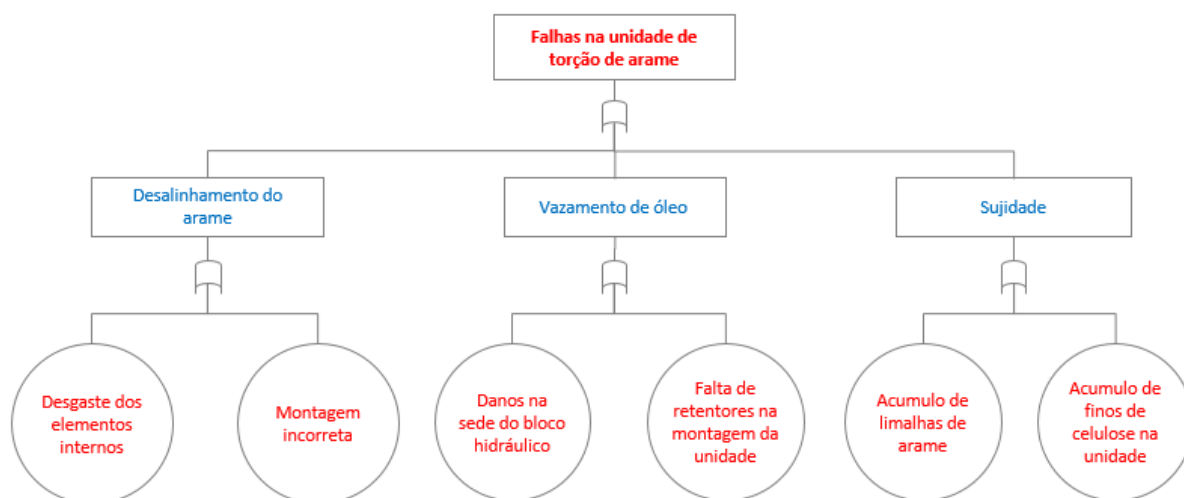
Gráfico 4.23 – Taxa de falhas da unidade de torção



Fonte: o autor (2019).

Conforme verificado no gráfico 4.23, a taxa de falhas é decrescente em função do tempo (porção inicial da curva da banheira). O aprofundamento da análise é apresentado na figura 4.28.

Figura 4.28 – FTA Unidade de torção



Fonte: o autor (2019).

Conforme observado na figura 4.28, as falhas da unidade de torção estão fortemente associadas à desgaste de elementos internos, vazamento de óleo e presença de limalhas de arame no interior da unidade.

#### 4.10 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE

Verifica-se que 21 dos 22 itens de impacto na disponibilidade da linha de enfardamento que foram selecionados após a simulação possuem fator de forma  $\beta \leq 1$ , característica de taxa de falhas decrescente em função do tempo e muito próximas à região de falhas aleatórias. Isso faz com que a ideia de estabelecer uma política de manutenção preventiva não tenha o efeito esperado, uma vez que a probabilidade de falhas é maior quando o componente é novo ou quando o equipamento é mantido.

Isso fez com que para o melhor entendimento dos eventos, fossem elaboradas as análises utilizando a ferramenta FTA, buscando evidenciar as causas básicas e entender seus ativadores.

Fatores relacionados a esse comportamento da taxa de falhas tem forte associação com problemas de projeto, operação em condições fora dos parâmetros e qualidade dos serviços de manutenção.

O relatório final da análise é apresentado a seguir, com os itens analisados agrupados por equipamentos e com suas respectivas ações para prevenção das falhas.



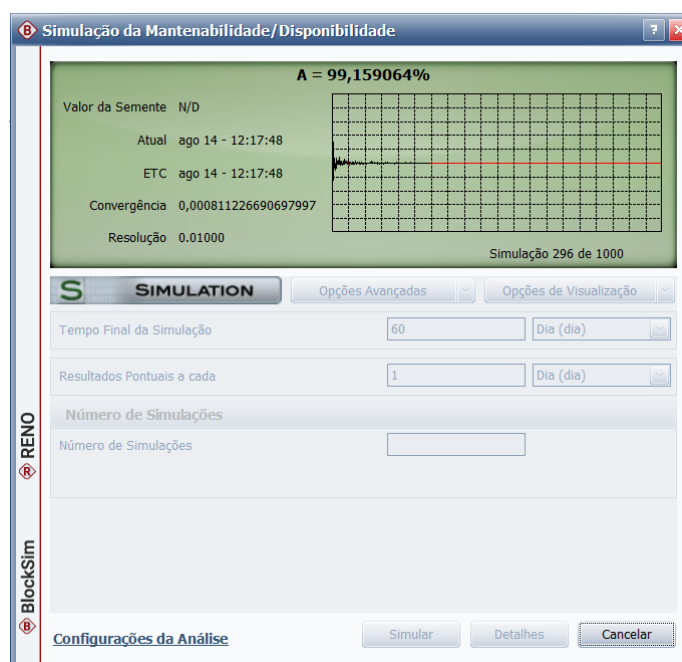
Quadro 4.1 – Ações preventivas, preditivas e corretivas com base nas análises

Equipamento	Subsistema / Componente	$\beta$	Comportamento Tx. Falhas	Modo de Falha	Causas Identificadas (FTA)	Ações de Prevenção / Melhoria	Periodicidade		
Transportador de Giro	Cabeamento elétrico	0,39	Decrescente	Danos ao revestimento	Incidentes com equipamento	Instrução equipe de manutenção	-		
				Ressecamento do revestimento	Falta de inspeção preventiva	Criação de plano de inspeção	6 meses		
				Ressecamento do revestimento	Atmosfera com vapores químicos	Nenhuma - condição inerente	-		
				Desgaste rolete guia	Falta de inspeção preventiva	Criação de plano de inspeção	6 meses		
				Desgaste rolete guia	Fim de vida útil	Criação de plano de troca preventiva	24 meses		
	Transportador de Translação	Cabo guia	0,98	Aprox. Constante	Roletes guia agarrando no trilho	Falta de lubrificação	Criação de plano de lubrificação	6 meses	
					Rompimento por travamento da cortina	Falta de inspeção preventiva	Criação de plano de inspeção	6 meses	
					Desgaste rolete guia	Falta de inspeção preventiva	Criação de plano de inspeção	6 meses	
					Desgaste rolete guia	Fim de vida útil	Criação de plano de troca preventiva	24 meses	
					Roletes guia agarrando no trilho	Falta de lubrificação	Criação de plano de lubrificação	6 meses	
Prensa de Fardos		C. Sensores	0,53	Decrescente	Corrosão do cabo	Falta de inspeção preventiva	Criação de plano de inspeção	6 meses	
					Afrouxamento / quebra fixadores	Falta de procedimento torqueamento	Instrução equipe de manutenção	-	
					Afrouxamento / quebra fixadores	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-	
					Desalinhamento do suporte	Ajustes fora do padrão	Instrução equipe de operação	-	
					Cabo danificado	Atrito com estrutura	Criação de plano de inspeção	6 meses	
	C. Bombas hidráulicas	0,58	Decrescente	Problema na conexão	Falta de inspeção preventiva	Criação de plano de inspeção	6 meses		
				Problema na conexão	Corrosão	Criação de plano de inspeção	6 meses		
				Problema na conexão	Falha de fixadores	Criação de plano de inspeção	6 meses		
				Ajustes fora do padrão	Falta de conhecimento dos ajustes	Instrução equipe de operação	-		
				Falha de comunicação	Indicação falsa	Criação de plano de inspeção	6 meses		
				Cabo / conector danificado	Atrito com estrutura	Criação de plano de inspeção	6 meses		
				Cabo / conector danificado	Degradação / vida útil	Criação de plano de inspeção	6 meses		
				Funcionamento fora do padrão	Ajustes fora do padrão	Instrução equipe de operação	-		
				Baixa eficiência	Desgaste componentes internos	Criação de plano de troca preventiva	60 meses		
				Baixa eficiência	Vazamento de óleo	Criação de plano de troca preventiva	15 meses		
C. Cilindros hidráulicos	0,75	Decrescente	Travamento da bomba	Particulados no óleo	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Travamento da bomba	Quebra de componentes internos	Criação de plano de troca preventiva	24 meses			
			Vazamentos de óleo	Rompimento de vedações	Adequação reparo externo	-			
			Vazamentos de óleo	Cilindros fora de dimensão	Adequação reparo externo	-			
			Vazamentos de óleo	Trincas na camisa	Criação de plano de inspeção	15 meses			
			Quebra de fixadores	Furos roscados danificados	Criação de plano de inspeção	15 meses			
			Quebra de fixadores	Falta de arruela de trava	Instrução equipe de manutenção	-			
			Quebra de fixadores	Fim de vida útil	Criação de plano de troca preventiva	15 meses			
			Rompimento de vedações	Aplicação de material incorreto	Instrução equipe de manutenção	-			
			Falha de montagem	Torqueamento insuficiente	Instrução equipe de manutenção	-			
C. Vedações	1,19	Crescente	Falha de montagem	Montagem desalinhada	Instrução equipe de manutenção	-			
			Trincas / furos nos tubos	Fadiga estrutural tubos	Criação de plano de inspeção	15 meses			
			Trincas / furos nos tubos	Baixa qualidade soldagem	Instrução equipe de manutenção	-			
			Falha de montagem	Torqueamento insuficiente	Instrução equipe de manutenção	-			
			Falha de montagem	Tubulação montada sob tensão	Instrução equipe de manutenção	-			
			Indicação falsa	Sujidade no sensor	Instrução equipe de operação	-			
			Indicação falsa	Mau contato cabo	Criação de plano de inspeção	6 meses			
			Desalinhamento de sensor	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-			
			Desalinhamento de sensor	Ajustes fora do padrão	Instrução equipe de operação	-			
			Vazamentos de ar	Avarias nas vedações	Criação de plano de inspeção	3 meses			
C. Cilindros Pneumáticos	0,77	Decrescente	Vazamentos de ar	Deterioração das vedações	Criação de plano de troca preventiva	24 meses			
			Quebra de fixadores	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-			
			Quebra de fixadores	Falta de arruela de trava	Instrução equipe de manutenção	-			
			Quebra de haste do cilindro	Desprendimento pino de fixação	Instrução equipe de manutenção	-			
			Quebra de haste do cilindro	Quebra de haste do cilindro	Instrução equipe de operação	-			
			Quebra de acoplamento	Travamento de bomba	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Deterioração das vedações	Fim de vida útil	Criação de plano de troca preventiva	24 meses			
			Quebra de estruturas	Vibração excessiva	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Travamento de rolamentos	Ausência de rota de inspeção	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Vazamentos de graxa	Deterioração das vedações	Criação de plano de inspeção	2 meses			
Motor Elétrico	0,27	Decrescente	Queima de motor	Sobrecarga	Instrução equipe de operação	-			
			Queima de motor	Curto entre espiras	Adequação reparo externo	-			
			Avaria nos roletes de alim.	Fim de vida útil	Criação de plano de troca preventiva	15 meses			
			Avaria nos roletes de alim.	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-			
			Quebra de estrutura	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-			
			Quebra de estruturas	Desprendimento de fixadores	Instrução equipe de manutenção	-			
			Desalinhamento de roda de alim.	Ajustes fora do padrão	Instrução equipe de manutenção	-			
			Desalinhamento de roda de alim.	Tensão insuficiente da correia	Instrução equipe de manutenção	-			
			Quebra de estrutura	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-			
			Quebra de estrutura	Desprendimento de fixadores	Instrução equipe de manutenção	-			
Sist. Alim. Capas	0,62	Decrescente	Vazamento de ar	Furos em mangueiras	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Quebra de haste do cilindro	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-			
			Aberturas nos dutos	Trincas devido vibração excessiva	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Agarramento válvula dir.	Sujidade	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Problemas no ciclo	Desajuste válvula de sequência	Instrução equipe de manutenção	-			
			Agarramento de arame	Desgaste dos trilhos	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Agarramento de arame	Arame sem filme lubrificante	Instrução equipe de operação	-			
			Desalinhamento do arame	Desgaste dos trilhos	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Desalinhamento do arame	Desgaste componentes internos	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Vazamento de óleo	Danos sede bloco	Instrução equipe de operação	-			
Unidade de Torção	0,94	Decrescente	Vazamento de óleo	Falta de montagem dos retentores	Instrução equipe de operação	-			
			Acumulo de limalhas	Falta de limpeza periódica	Instrução equipe de operação	-			
			Acumulo de limalhas	Arame sem filme lubrificante	Instrução equipe de operação	-			
			Vazamento de óleo	Vedação baixa qualidade	Adequação reparo externo	-			
			Vazamento de óleo	Cilindros fora de dimensão	Adequação reparo externo	-			
			Afrouxamento / quebra fixadores	Furos roscados danificados	Adequação reparo externo	-			
			Afrouxamento / quebra fixadores	Falta de arruela de trava	Instrução equipe de operação	-			
			Desprendimento de pino da haste	Desprendimento do anel elastico	Instrução equipe de manutenção	-			
			Desprendimento de pino da haste	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-			
			Vazamentos de ar	Avarias nas vedações	Criação de plano de inspeção	2 meses			
Vazamentos de ar	0,65	Decrescente	Deterioração das vedações	Deterioração das vedações	Criação de plano de troca preventiva	15 meses			
			Quebra de fixadores	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-			
			Quebra de fixadores	Falta de arruela de trava	Instrução equipe de manutenção	-			
			Falha de indicação	Fixação fora do padrão	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Quebra de haste do cilindro	Desprendimento de pino de fixação	Instrução equipe de manutenção	-			
			Quebra de haste do cilindro	Ajustes fora do padrão	Instrução equipe de operação	-			
			Baiko vácuo	Falha da bomba de vácuo	Criação de plano de troca preventiva	15 meses			
			Baiko vácuo	Falta de purga na linha	Instrução equipe de operação	-			
			Desalinhamento do cabeçote	Afrouxamento de fixadores	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Desalinhamento do cabeçote	Suporte empenado	Instrução equipe de manutenção	-			
Vazamentos de ar	0,79	Decrescente	Deterioração das vedações	Deterioração das vedações	Criação de plano de troca preventiva	15 meses			
			Vazamentos de ar	Ressecamento das vedações	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Afrouxamento / quebra fixadores	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-			
			Afrouxamento / quebra fixadores	Falta de arruela de trava	Instrução equipe de manutenção	-			
			Quebra de estrutura	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-			
			Quebra de estrutura	Desprendimento de fixadores	Instrução equipe de manutenção	-			
			Quebra de haste do cilindro	Ajustes fora do padrão	Instrução equipe de operação	-			
			Quebra de haste do cilindro	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-			
			Quebra de correntes	Perda de espessura da placa	Criação de plano de troca preventiva	30 meses			
			Quebra de correntes	Travamento na roda dentada	Criação de plano de inspeção	2 meses			
Alongamento corrente de acion.	0,59	Decrescente	Alongamento corrente de acion.	Baixo tensionamento da corrente	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Alongamento corrente de acion.	Fim de vida útil	Criação de plano de inspeção	2 meses			
			Vazamento de óleo	Vedação baixa qualidade	Adequação reparo externo	-			
			Vazamento de óleo	Cilindros fora de dimensão	Adequação reparo externo	-			
			Afrouxamento / quebra fixadores	Furos roscados danificados	Instrução equipe de manutenção	-			
			Afrouxamento / quebra fixadores	Falta de arruela de trava	Instrução equipe de manutenção	-			
			Quebra de pino	Folga excessiva no alojamento	Instrução equipe de manutenção	-			
			Quebra de pino	Elevados impactos em operação	Instrução equipe de operação	-			
			Desalinhamento do arame	Desgaste componentes internos	Criação de plano de troca preventiva	2 meses			
			Desalinhamento do arame	Montagem desalinhada	Instrução equipe de manutenção	-			
Vazamento de óleo	0,73	Decrescente	Vazamento de óleo	Danos sede bloco	Instrução equipe de operação	-			
			Vazamento de óleo	Falta de montagem dos retentores	Instrução equipe de operação	-			
			Sujidade	Acumulo de fibras de celulose	Instrução equipe de operação	-			
			Sujidade	Acumulo de limalhas	Instrução equipe de operação	-			
			Unidade de Torção	0,71	Decrescente	Vazamento de óleo	Danos sede bloco	Instrução equipe de operação	-
						Vazamento de óleo	Falta de montagem dos retentores	Instrução equipe de operação	-
						Sujidade	Acumulo de fibras de celulose	Instrução equipe de operação	-
						Sujidade	Acumulo de limalhas	Instrução equipe de operação	-

Fonte: o autor (2019).

Dessa forma, procedeu-se com uma nova simulação de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade da linha de enfardamento em estudo, considerando-se que os modos de falha dos componentes e subsistemas exibidos no quadro 4.1 tenham sido tratados e as ações implementadas na área com sucesso. Os resultados são exibidos na figura 4.29.

Figura 4.29 – Simulação de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade.

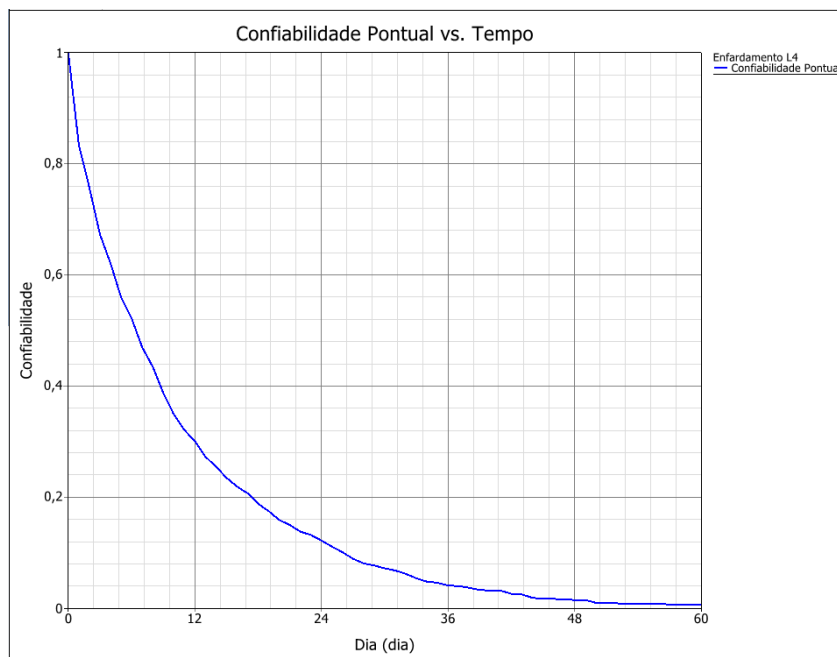


Fonte: o autor (2019).

Comparando a nova simulação RAM da figura 4.29 com a primeira simulação realizada da figura 4.5, verifica-se um aumento significativo na disponibilidade, partindo de 94,51 para 99,15 após a eliminação dos modos de falha dos 22 principais componentes e subsistemas dos equipamentos da linha de enfardamento.

A confiabilidade pontual do sistema também aumentou significativamente, como pode-se observar no gráfico 4.24.

Gráfico 4.24 – Curva de confiabilidade pontual da linha de enfardamento



Fonte: o autor (2019).

O aumento da confiabilidade do sistema gera de forma direta um impacto na disponibilidade. Pode-se observar no gráfico 4.23 que, comparando com o gráfico 4.1, o declínio da curva de confiabilidade pontual se dá de forma bastante suave após a resolução dos principais problemas que impactam na disponibilidade da linha.

## 5 CONCLUSÃO

O resultado desse trabalho é uma estratégia de manutenção adequada à atual condição de funcionamento dos equipamentos de enfardamento. Verifica-se que, em um primeiro momento, o estabelecimento de uma rotina de manutenção preventiva não é a melhor tática para aumento da disponibilidade, visto que os principais itens de impacto na disponibilidade possuem característica de taxa de falhas decrescente. Isso faz com que seja necessário dar um primeiro passo, eliminando os modos de falha de maior impacto na disponibilidade, para posteriormente buscar a implementação de uma rotina de manutenção preventiva. Essa constatação foi possível por meio da análise utilizando as ferramentas LDA e RAM, onde ganhou-se visão ímpar do comportamento dos equipamentos.

Para aprofundar e entender as causas básicas das falhas, foram realizadas análises por árvore de falhas (FTA's) específicos dos sistemas e componentes de menor disponibilidade. Isso propiciou traçar planos de ação voltados à solução dos problemas que resultam nas falhas.

Com a nova simulação de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, pode-se verificar que existe possibilidade de aumento significativo na disponibilidade com a eliminação dos modos de falha estudados nesse trabalho.

Dessa forma, os itens apresentados no quadro 4.1 serão detalhados e os planos de ação implementados, buscando o resultado de disponibilidade verificado na segunda simulação, apresentado na figura 4.29 (um aumento de 4,64% na disponibilidade do enfardamento).

Os principais desafios encontrados na realização desse trabalho foram voltados à tratamento dos dados. Foi necessário a leitura de mais de 1.500 ocorrências e inserção de informações (qual componente ou subsistema falhou, o modo de falha e o cálculo de vida média ou MTBF), para que fosse possível proceder com as análises de dados de vida.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a normalização das condições de funcionamento dos equipamentos, poderão ser aplicadas outras ferramentas de confiabilidade para refinar ainda mais a

estratégia preventiva. Uma vez que a vida dos componentes passe a apresentar características de desgaste ( $\beta > 1$ ), poderão ser feitas análises de degradação para determinação do ponto ótimo de substituição.

As análises de ciclo de vida do equipamento serão bastante úteis para determinar a viabilidade econômica da manutenção do equipamento até sua substituição, de acordo com seu plano de trabalho.

A aplicação da análise RAM pode também ser estendida aos demais equipamentos da planta para avaliação de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. A ferramenta mostra-se bastante relevante para a realização de simulações e identificação de oportunidades na estratégia de manutenção dos ativos.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5462: **Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994. 37p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

AZEVEDO, Celso de. **Se as máquinas falassem**: uma conversa franca sobre a gestão de ativos industriais. São Paulo: Editora Saraiva, 2007.

KECECIOGLU, Dimitri. Reliability Engineering Handbook. Vol. 1. Pennsylvania: DEStech, 2002. 691p.

MAZZEI, Denis. **RAM Analysis**. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2018.

RELIASOFT. *System Reliability Analysis*. Disponível em: <[http://reliawiki.org/index.php/Fault\\_Tree\\_Diagrams\\_and\\_System\\_Analysis](http://reliawiki.org/index.php/Fault_Tree_Diagrams_and_System_Analysis)>. Acesso em: 14 ago 2019.

RELIASOFT. *System Reliability Analysis*. Disponível em: <[http://reliawiki.org/index.php/Basics\\_of\\_System\\_Reliability\\_Analysis](http://reliawiki.org/index.php/Basics_of_System_Reliability_Analysis)>. Acesso em: 14 ago 2019.

RELIASOFT. *Life Data Analysis Reference*. Disponível em: [http://reliawiki.org/index.php/Life\\_Data\\_Analysis\\_Reference\\_Book](http://reliawiki.org/index.php/Life_Data_Analysis_Reference_Book). Acesso em: 12 ago 2019.

RIGONI, Emerson. **Metodologia de Análise de Falhas**. 4. Parte. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2018.