

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

OBERDAN VINÍCIUS THEVES DE CASTRO

APLICAÇÃO DE PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM CALDEIRA MISTA  
COM AUXÍLIO DA FERRAMENTA FMEA

Joinville

2022

OBERDAN VINÍCIUS THEVES DE CASTRO

APLICAÇÃO DE PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM CALDEIRA MISTA  
COM AUXÍLIO DA FERRAMENTA FMEA

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel no Curso de  
Graduação em Engenharia Automotiva do  
Centro Tecnológico de Joinville da  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Modesto Hurtado Ferrer

Joinville

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Castro, Oberdan Vinicius Theves de  
Aplicação de plano de manutenção preventiva em caldeira  
mista com auxílio da ferramenta FMEA / Oberdan Vinicius  
Theves de Castro ; orientador, Modesto Hurtado Ferrer,  
2022.  
83 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,  
Graduação em Engenharia Automotiva, Joinville, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Automotiva. 2. Manutenção Preventiva. 3.  
Sistema de Tiragem. 4. FMEA. 5. Distribuição Weibull. I.  
Ferrer, Modesto Hurtado. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Automotiva. III. Título.

OBERDAN VINÍCIUS THEVES DE CASTRO

APLICAÇÃO DE PLANO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM CALDEIRA MISTA  
COM AUXÍLIO DA FERRAMENTA FMEA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Modesto Hurtado Ferrer  
Orientador

---

Dr. Luis Fernando Peres Calil  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Evandro Cardozo da Silva  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Me. Antônio Pedro Tessaro  
Membro  
Universidade Alto Vale do Rio do Peixe

Dedico este trabalho aos meus pais Everaldo e  
Marisete, minha irmã Ana Carolina e minha noiva  
Helena.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por todas as bênçãos e oportunidades que me foram dadas.

À toda minha família, em especial meus pais, Everaldo e Marisete, por todo apoio e dedicação a mim. Minha irmã Ana Carolina, por todos os abraços, carinhos, saudade e risadas.

À minha companheira de vida Helena, que sempre me apoiou e me deu suporte nos momentos difíceis e comemorou ao meu lado as conquistas da vida, meu muito obrigado por tudo que fez e ainda faz por nós.

A todos os professores do CTJ, que de algum modo fizeram parte desta caminhada, pela paciência, pelos ensinamentos e grande apoio. Em especial ao professor Modesto, que me acolheu sem pestanejar e me incentivou a continuar firme.

Todos os parceiros que a vida me apresentou e presenteou, grandes amigos, em especial Fernando Braga, que acompanhou de perto todos os momentos até a saída de Joinville, Diogo, Paulo, Rubini, Matheus, Renan Japa, Vitão e tantos outros que batalharam ao meu lado neste período, meu grande abraço e obrigado a todos.

Aos amigos que fiz durante os períodos de estágio. Luiz Barbetta e Nati, grandes profissionais e maravilhosas pessoas que me ensinaram muito e devo muito a vocês. Marcos pelas risadas, parceria e dedicação aos estudos em conjunto.

“Onde há determinação, o caminho pode ser encontrado”.  
(CLASON, 1926)

## RESUMO

A manutenção é de suma importância para a boa operação e o bom andamento dos negócios de uma empresa, por meio dela é possível manter equipamentos operando sem interrupções e também recuperar ativos já falhados. As ferramentas de qualidade são utilizadas para o aprimoramento dos resultados das empresas, focadas em definir, medir, analisar e resolver problemas. Este trabalho visou a implementação de um plano de manutenção preventiva, auxiliado pela ferramenta de qualidade *FMEA* (Análise de modo de falha e efeito do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*), no setor de caldeiras e secagem de madeira de uma indústria madeireira. Dados foram obtidos através de busca em arquivos de manutenção da empresa, criaram-se então indicadores tempo médio até a falha, tempo médio para reparo, tempo médio entre falhas e disponibilidade, para que fosse possível quantificar e comparar resultados posteriores. A ferramenta *FMEA* foi utilizada para elencar os principais modos de falha encontrados no setor, onde foi possível detectar um modo de falha de alta criticidade que não havia sido detectado até então. A distribuição de Weibull foi utilizada para a análise das falhas ocorridas e criação do cronograma de atividades preventiva, onde auxiliaria na comprovação da eficácia do plano. Após seis meses de aplicação do plano de manutenção, foi possível identificar a eficácia da manutenção preventiva com respeito à melhoria na condição dos componentes com o aumento do tempo de disponibilidade, ao custo que nos meses iniciais ficou explícito a alta economia para a empresa.

**Palavras-chave:** Manutenção Preventiva. *FMEA*. Sistema de Tiragem. Weibull.



## ABSTRACT

Maintenance is of paramount importance for the proper operation and smooth running of a company's business, through which it is possible to keep equipment operating without interruptions and also recover assets that have already failed. Quality tools are used to improve company results, focused on defining, measuring, analyzing and solving problems. This work aimed to implement a preventive maintenance plan, aided by the FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) quality tool, in the boiler and wood drying sector of a wood industry. Data were obtained through a search in the company's maintenance files, mean time to failures, mean time to repair, mean time between failures and availability indicators were then created, so that it was possible to quantify and compare later results. The FMEA tool was used to list the main failure modes found in the sector, where it was possible to detect a highly critical failure mode that had not been detected until then. The Weibull distribution was used to analyze the failures that occurred and create the schedule of preventive activities, which would help to prove the effectiveness of the plan. After six months of application of the maintenance plan, it was possible to identify the effectiveness of preventive maintenance with respect to the improvement in the condition of the components with the increase of the availability time, at the cost that in the initial months the high savings for the company were explicit.

**Keywords:** Preventive maintenance. FMEA. Exhaust system. Weibull.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caldeira Flamotubular tipo Escocesa .....	18
Figura 2 - Caldeira aquotubular com grelha rotativa.....	20
Figura 3 - Caldeira Lancaster com dois a quatro tubulões .....	21
Figura 4 - Representação dos Tubulões superior e inferior.....	22
Figura 5 - Caldeira vertical com fornalha interna.....	24
Figura 6 - Caldeira Cornuália ou Cornovaglia .....	25
Figura 7 - Caldeira multitubular .....	26
Figura 8 - Caldeira Escocesa .....	26
Figura 9 - Caldeira Aquotubular.....	27
Figura 10 - Relação entre peso específico da água em forma líquida e vapor, em função da pressão de trabalho .....	29
Figura 11 - Demonstração de circulação natural, em formas construtivas do tipo “O” (esquerda) e tipo “D” (direita).....	30
Figura 12 - Caldeira de La-Mont, circulação assistida.....	31
Figura 13 - Caldeira Mista.....	32
Figura 14 - Tipos de tiragens em caldeiras.....	33
Figura 15 - Válvula de segurança e suas funções.....	37
Figura 16 - Garrafa, Visor do nível de água e Manômetro.....	38
Figura 17 - FMEA Funcional (a), FMEA estrutural (b).....	44
Figura 18 - Placa de Identificação e informações sobre a caldeira .....	48
Figura 19 - Escotilha do rotor do sistema de tiragem.....	53
Figura 20 - Regressão linear: a) X em Y e b) Y em X .....	58
Figura 21 - Gráfico linearizado da probabilidade acumulada de falha $F(t)$ .....	59
Figura 22 - Gráficos gerados no Minitab para rolamentos .....	60
Figura 23 - Gráfico Resultante dos KPIs.....	63
Figura 24 - Gráfico da disponibilidade do equipamento .....	64
Figura 25 - Gráficos gerados no Minitab para os rolamentos .....	68
Figura 26 - Probabilidades de falha para rolamentos segundo Weibull.....	69
Figura 27 - Gráficos e parâmetros iniciais obtidos para os mancais .....	80
Figura 28 - Gráficos e parâmetros finais obtidos para os mancais.....	81
Figura 29 - Gráficos e parâmetros iniciais obtidos para as correias.....	82

Figura 30 - Gráficos e parâmetros finais obtidos para as correias .....83

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Passos para a realização de um FMEA .....	50
Quadro 2 - Valores mais críticos de NPR estabelecidos .....	52
Quadro 3 - Período dos dados obtidos de modo geral.....	54
Quadro 4 - Tempo das paradas em horas .....	55
Quadro 5 - Indicadores mensais ( <i>MTTF</i> , <i>MTTR</i> , <i>MTBF</i> e Disponibilidade) .....	55
Quadro 6 - Dados referentes aos rolamentos.....	58
Quadro 7 - Valores dos eixos das abcissas e ordenadas para rolamentos .....	59
Quadro 8 - Resultados dos parâmetros de forma e escala iniciais.....	61
Quadro 9 - Indicadores para os meses de fevereiro (antes das ações) e janeiro (depois das ações) .....	65
Quadro 10 - Novos valores de NPR .....	65
Quadro 11 - Dados obtidos para os rolamentos.....	68
Quadro 12 - Resultados dos parâmetros de Weibull .....	70
Quadro 13 - Quadro FMEA.....	75
Quadro 14 - Cronograma de atividades preventivas .....	76
Quadro 15 - Tempo de paradas mensais.....	78
Quadro 16 - Dados mensais de funcionamento da caldeira.....	78
Quadro 17 - Indicadores <i>MTBF</i> , <i>MTTF</i> , <i>MTTR</i> e Disponibilidade de todo período .....	79
Quadro 18 - Dados iniciais dos Mancais .....	80
Quadro 19 - Dados finais dos Mancais.....	80
Quadro 20 - Dados iniciais das correias .....	81
Quadro 21 - Dados finais das correias.....	82

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AIAG - Automotive Industry Action Group

CDF – Cumulative Distribution Function (Função de distribuição acumulada)

FMEA - Failure Mode and Effects Analysis (Análise de modo e efeito de falha)

ISO - International Standard Organization

KPI - Key Performance Indicator (Indicador chave de desempenho)

MTBF - Mean Time Between Failure (Tempo médio entre falhas)

MTTF - Mean Time to Failure (Tempo médio até a falha)

MTTR - Mean Time to Repair (Tempo médio para reparo)

NR - Norma Regulamentadora

NPR - Número de prioridade de risco

PDF – Probability Density Function (Função densidade de probabilidade)

PMTA - Pressão Máxima de Trabalho Admissível

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>16</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>CALDEIRAS DE GERAÇÃO DE VAPOR</b> .....	<b>18</b>
2.1	PRINCIPAIS COMPONENTES.....	19
2.1.1	<b>Fornalha</b> .....	<b>20</b>
2.1.2	<b>Tambores ou tubulões</b> .....	<b>21</b>
2.2	CALDEIRAS FLAMOTUBULARES .....	23
2.3	CALDEIRAS AQUOTUBULARES .....	27
2.3.1	<b>Circulação Natural</b> .....	<b>29</b>
2.3.2	<b>Circulação Assistida</b> .....	<b>30</b>
2.3.3	<b>Circulação Forçada</b> .....	<b>31</b>
2.4	CALDEIRAS MISTAS .....	32
2.5	SISTEMA DE TIRAGEM DA CALDEIRA .....	33
2.5.1	<b>Tiragem Natural</b> .....	<b>33</b>
2.5.2	<b>Tiragem Forçada</b> .....	<b>34</b>
2.5.3	<b>Tiragem Induzida</b> .....	<b>35</b>
2.5.4	<b>Tiragem Balanceada</b> .....	<b>35</b>
2.6	SEGURANÇA EM CALDEIRAS .....	35
2.6.1	<b>Dispositivos de Segurança</b> .....	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>MANUTENÇÃO</b> .....	<b>39</b>
3.1	MANUTENÇÃO CORRETIVA.....	39
3.2	MANUTENÇÃO PREVENTIVA POR TEMPO (MANUTENÇÃO PROGRAMADA) .....	40
3.3	MANUTENÇÃO PREVENTIVA POR CONDIÇÃO (MANUTENÇÃO PREDITIVA).....	41
3.4	<i>FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA)</i> .....	42
3.4.1	<b>Risco de falha e o Número de prioridade de risco (RPN)</b> .....	<b>44</b>
3.4.2	<b>Etapas de um FMEA</b> .....	<b>45</b>
3.4.3	<b>FMEA e requisitos de normas</b> .....	<b>46</b>
3.5	DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL .....	46

<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>48</b>
4.1	CALDEIRA.....	48
4.2	DESENVOLVIMENTO DO PLANO DE MANUTENÇÃO DA CALDEIRA EM ANÁLISE.....	49
<b>4.2.1</b>	<b>Análise de tempos até a falha através da distribuição de Weibull.....</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>62</b>
5.1	INDICADORES CHAVE DE DESEMPENHO (KPI).....	62
5.2	CÁLCULO DO NOVO NPR.....	65
5.3	CUSTOS DE MANUTENÇÃO .....	66
5.4	ANÁLISE DE WEIBULL.....	67
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE A – QUADRO FMEA.....</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE B – CRONOGRAMA DE ATIVIDADES PREVENTIVAS.....</b>	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE C – QUADROS DE INDICADORES CHAVE DE DESEMPENHO MENSAS.....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE D – DADOS PARA ANÁLISE DE WEIBULL E GRÁFICOS RESULTANTES .....</b>	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A manutenção industrial é dedicada ao manutenção dos ativos através de técnicas corretivas ou preventivas, para garantir a rotina de manufatura com máxima produtividade. Moro (2007) explana que se pode considerar como a engenharia do ativo, por analisar e controlar o desempenho das partes que o compõem evitando assim a quebra inesperada e as paradas de produção como consequência.

Com a incessante busca por qualidade, produtividade e redução de custos no âmbito industrial, os processos necessitam de constante análise, controle e manutenção. Desta forma, é de suma importância o estudo destes métodos de abordagem, para que se possa manter a disponibilidade máxima dos equipamentos.

Manutenções corretivas constantes são geradoras de custos elevados para as empresas, pois as paradas inesperadas de produção resultam em atraso de pedidos, insatisfação de clientes, custos extras de logística, entre outros, fazendo com que métodos preventivos sejam buscados com o intuito de evitar falhas críticas ao equipamento e o processo, aumentar a vida útil do ativo e por conseguinte aumentar a segurança de operação.

A manutenção de equipamentos de alto risco, como caldeiras e vasos de pressão, é de extrema importância para a empresa, pois afeta além da produção, a segurança de todos os envolvidos e seus arredores. A Norma Regulamentadora número 13 (NR-13) exige que os itens de controle, segurança e componentes atuantes no sistema sejam todos mantidos em boas condições estabelecendo requisitos mínimos para a gestão da integridade do equipamento (BRASIL, 2019).

A manutenção preventiva é o cuidado e dispor da equipe de manutenção para manter o estado de operação do equipamento satisfatório através de inspeções programadas, detecção e correção de falhas antes que se desenvolvam falhas críticas (DHILLON, 2006).

As ferramentas de qualidade auxiliam na identificação, definição, aferição, análise e resolução de problemas encontrados durante o processo que penalizam o desempenho de um sistema, equipamento ou componente. A *FMEA* é uma destas ferramentas de gestão de risco que tem por objetivo prevenir a ocorrência de acidentes, e no caso da manutenção, objetiva reduzir a probabilidade do modo de falha e/ou atenuar seus defeitos (MCDERMOTT; MIKULAK; BEAUREGARD, 2008).

Para análise e predição de falhas, os métodos estatísticos são amplamente utilizados. No dia a dia das empresas a economia de gastos indesejados é de suma importância. O método



de análise pela distribuição de *Weibull* se destaca por necessitar de um número pequeno de falhas para gerar resultados satisfatórios da análise. Isso gera um retorno positivo para a empresa, visto que não será necessária uma grande quantidade de falhas de determinado componente para a obtenção de dados concretos. Dados como a probabilidade de falha, confiabilidade e a natureza de falha do componente, por exemplo, são obtidos de forma simples e prática nos gráficos gerados pela análise.

Após uma análise prévia do conjunto de estruturas, decidiu-se focar o estudo no sistema de tiragem da caldeira, onde apresentava os itens mais críticos para o funcionamento. Portanto, o presente trabalho busca implementar um plano de manutenção preventiva no sistema de tiragem de uma caldeira mista, com o auxílio da ferramenta de análise de modos de falha e efeitos (FMEA) para a identificação dos modos mais críticos e posterior avaliação da eficácia do plano.

## 1.1 OBJETIVOS

Esta seção do trabalho apresenta os anseios causadores do estudo, os passos seguidos para a obtenção de bons resultados apresentados na conclusão do mesmo.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como maior objetivo a implementação de um plano de manutenção preventiva no sistema de tiragem especificamente, com a finalidade de obter maior rendimento do equipamento, reduzindo o número de manutenções corretivas realizadas com o aumento da confiabilidade dos seus componentes.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar a ferramenta de análise de modo e efeito de falha potencial (FMEA) como meio de identificar os principais problemas causadores do mau funcionamento do sistema de tiragem;
- Realizar análise de Weibull para estimar a periodicidade das atividades preventivas, buscando aumentar a confiabilidade dos componentes;

- Desenvolver indicadores de desempenho (KPI) através de dados e posteriormente utilizá-los como meio de comparação para resultados;
- Aumentar a disponibilidade do sistema, a fim de reduzir retrabalhos e refugos na linha de produção, gerando assim uma redução nos custos da empresa.

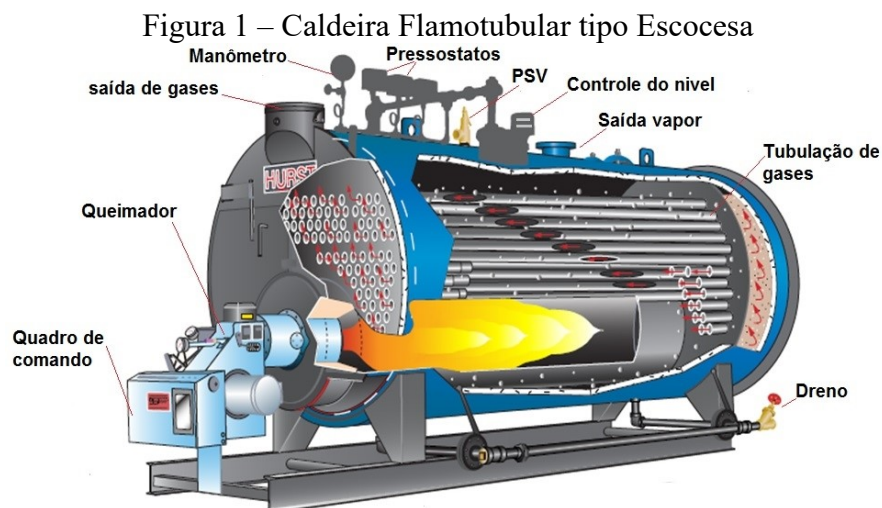
## 2 CALDEIRAS DE GERAÇÃO DE VAPOR

Caldeiras, segundo Pera (1990), fazem parte do grupo dos geradores de vapor, os quais são definidos como trocadores de calor complexos, constituídos de vários equipamentos perfeitamente coesos, que produzem o vapor através do ar, combustível e um fluido vaporizante, com o intuito de gerar o mais alto rendimento térmico.

A norma NR-13 (BRASIL, 2019), define a caldeira a vapor como um equipamento projetado para produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando-se de qualquer fonte de energia.

Basicamente, uma caldeira a vapor se constitui de um vaso pressurizado com tubos, a água então recebe constante aplicação de calor de uma fonte externa (fornalha), assim gerando continuamente vapor (PERA, 1990).

Como pode ser observado na Figura 1, uma caldeira do modo de construção escocesa, apresenta um corpo flamotubular, onde os gases provenientes da queima são transportados pelas tubulações, realizando a transferência de calor para a água alojada em torno dos tubos. Esta forma de construção compõe o corpo da caldeira presente neste estudo, explicada no item 2.2 mais detalhadamente. Dispositivos de segurança, como válvulas de segurança, controle de nível e manômetro são descritos na seção 2.6.1.



Fonte: GBTécnica (2021, p. 1)

A fonte de calor pode ser originada de outros meios além da queima em fornalhas, como por exemplo com o aproveitamento do calor residual de processos industriais em turbinas a gás ou no escape de motores à diesel, estas caldeiras são conhecidas como caldeiras de

recuperação. Quando o fluido não vaporiza, utilizado nos processos de calefação, onde o fluido se encontra na fase líquida e em alta temperatura, a caldeira se classifica como de água de alta temperatura ou fluidos térmicos (PERA, 1990).

Uma caldeira moderna, com suas paredes d'água, absorvem cerca de 60% do calor irradiado proveniente da combustão, isso se dá pela boa condutividade térmica do material dos tubos. A alta temperatura gerada irradia muito calor para os tubos, assim que o tubo é aquecido, por convecção ele aquece a água no seu interior e assim gera o vapor, que se desloca para o topo da caldeira pela diferença de peso específico (HESELTON, 2004).

Atendendo NR-13 as caldeiras são classificadas em 3 categorias. As caldeiras de categoria A são classificadas assim por operarem com pressões iguais ou superiores a 1960 kPa (19,6 bar ou 19,98 kgf/cm<sup>2</sup>). Na categoria C se enquadram as caldeiras que operam em regime de pressão menor ou igual a 588 kPa (5,88 bar ou 5,99 kgf/cm<sup>2</sup>) com volume interno igual ou inferior a 100 litros. As restantes, que não se enquadram nas classes A e C, fazem parte da categoria B (BRASIL, 2019).

## 2.1 PRINCIPAIS COMPONENTES

Seguindo as normas e códigos do país em que se situa, os geradores de vapor são construídos de modo a obter o melhor aproveitamento da energia provida da queima do combustível. Devido a sua complexidade e alta segurança requerida, sua estrutura pode variar muito de acordo com sua finalidade (BAZZO, 1995).

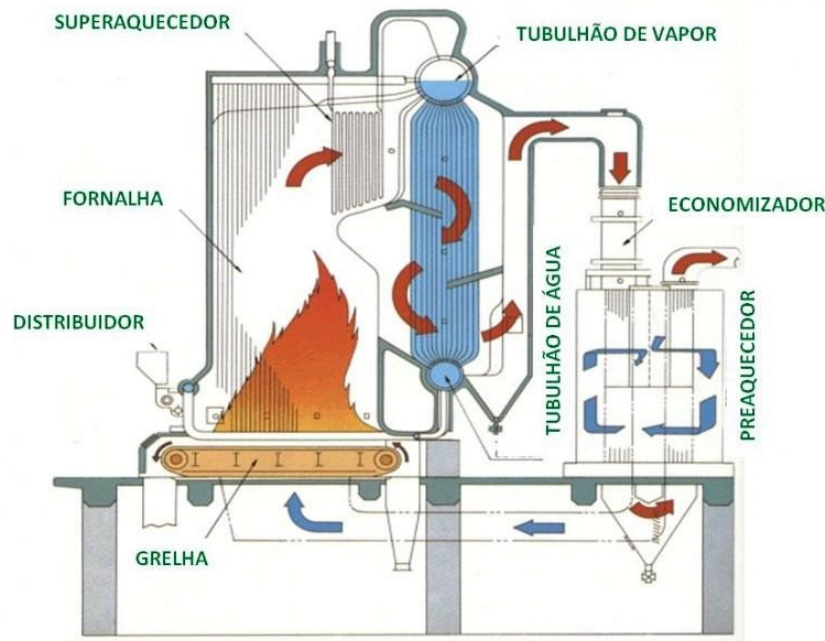
Geralmente as unidades geradoras de vapor de grande porte possuem componentes como a fornalha, caldeira, superaquecedor, economizador, aquecedor de ar, os canais dos gases e a chaminé, como mostrado na Figura 2. Pera (1990), ressalta que as unidades menores, utilizadas com o intuito de gerar vapor para indústrias de pequeno e médio porte, recebem simplesmente a nomenclatura de caldeiras onde dispensam a utilização de alguns componentes citados acima.

As partes metálicas da caldeira são selecionadas de modo que tenham um alto potencial para a troca térmica, fazendo que haja fluxo de calor por menor que seja a diferença de temperatura. Já as partes onde não se deseja a troca térmica ou propagação de calor, são utilizados materiais com baixa condutividade, como os tijolos refratários na parede de uma fornalha (HESELTON, 2004).

### 2.1.1 Fornalha

A fornalha, responsável pela transformação de energia química em energia térmica, contempla o local onde a queima dos combustíveis (sólidos, líquidos ou gasosos) ocorre, e pode ser dividida em fornalha com grelhas fixas, basculantes, grelhas rotativas, para queima de combustível sólido ou para queima de combustível em suspensão (BAZZO, 1995).

Figura 2 - Caldeira aquotubular com grelha rotativa



Fonte: GBTécnica (2021, p. 1)

Segundo Pera (1990), nas fornalhas ocorrem os processos mais importantes para o funcionamento regular do conjunto todo, pois é através da combustão na fornalha que se obtém a energia calorífica necessária para as operações desejadas.

O autor apresenta também uma divisão de setores da fornalha, denominados de aparelho de combustão e a câmara de combustão. Ambas as partes devem trabalhar sinergicamente devido o surgimento de fenômenos de alta complexidade no momento da combustão, por isso exige um alto aprofundamento em seus princípios. O aparelho de combustão é composto por componentes que facilitam a queima, oferecendo as condições necessárias, as grelhas basculantes, rotativas, queimadores de gás natural e óleo são exemplos de aparelhos de combustão.

A outra divisão conhecida por câmara de combustão, pode tanto fazer parte da fornalha como um todo, como formar uma região a parte. Esta câmara pode ser constituída pela alvenaria refratária da fornalha, ser integralmente irradiada, ou revestida de tubos chamada também de

parede de água. Região onde não deve haver mais matéria combustível apenas os gases produtos da combustão que atingem a região de absorção de calor através da convecção (PERA, 1990).

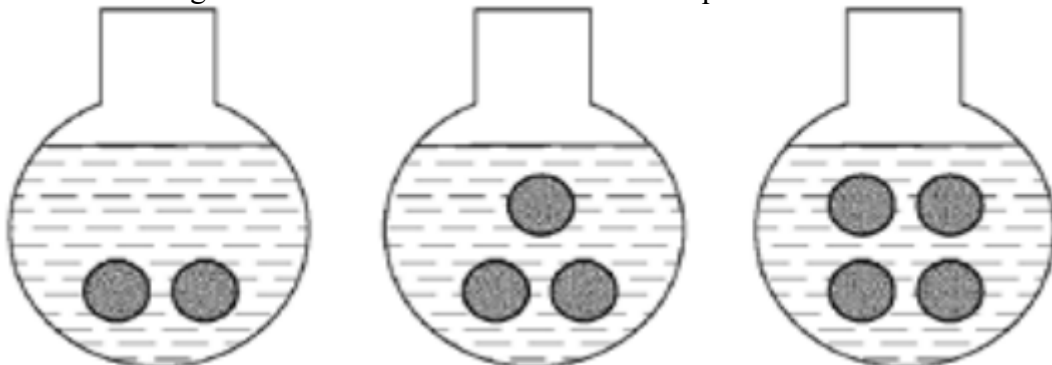
Para unidades menores, atuantes em pequenas e médias indústrias, as fornalhas com grelhas são muito utilizadas por representar um processo mais barato, conseqüentemente a queima de combustível sólido produz uma alta geração de fuligem, por apresentar qualidade inferior aos combustíveis gasosos, líquidos e particulados (BAZZO, 1995).

Uma fornalha operando em regime satisfatório, deve possibilitar a entrada de ar assim como sua distribuição em seu volume, com isso promover um controle da forma geométrica da chama. Deve também possuir um método seguro e adequado de alimentação de combustível, assegurando a estabilidade de queima tornando-a apta a alcançar a faixa de geração de calor necessária e manter sua integridade estrutural. A remoção de cinzas eficaz fará com que a queima completa do combustível seja alcançada, não prejudicando assim a câmara de combustão (PERA, 1990).

### 2.1.2 Tambores ou tubulões

Para as caldeiras fogotubulares, os tubulões (tubulhões) são destinados para a queima do combustível, bem como para a passagem dos gases da combustão em alta temperatura, realizando a troca térmica com a água presente em seu envoltório (STROBEL, 2013). Como pode ser visto na Figura 3, os modelos mais primitivos de caldeiras utilizavam tubulões de grande porte em menor número, e com a evolução das caldeiras, buscou-se aumentar a área de contato para assim melhorar a eficiência da troca de calor e obter melhores resultados (Figura 3).

Figura 3 - Caldeira Lancaster com dois a quatro tubulões

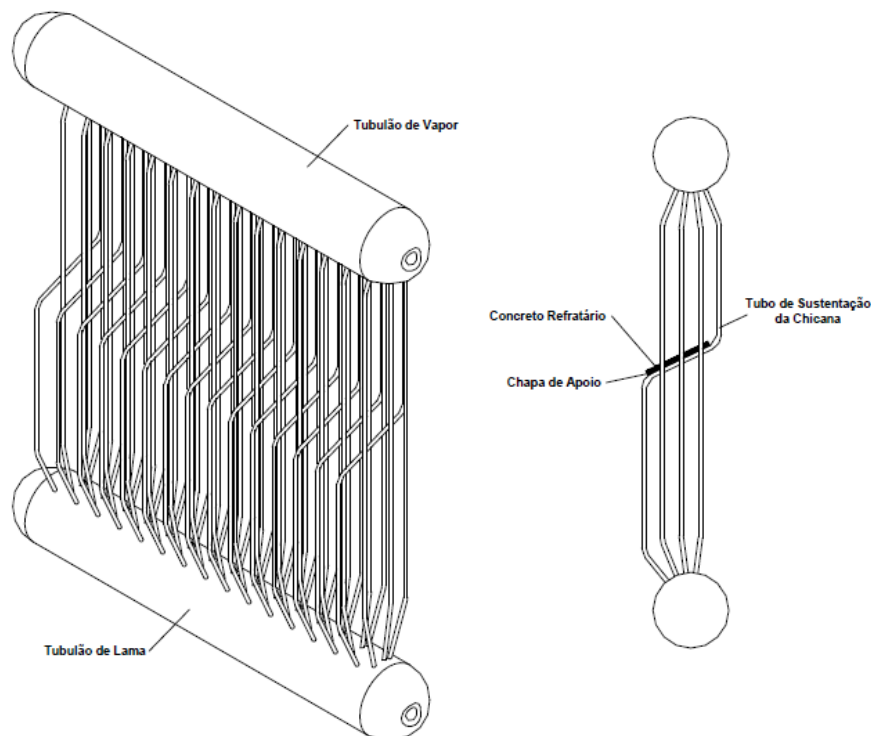


Fonte: Strobel (2013, p. 10).

Os tambores superiores, “Tubulão de vapor” identificado na Figura 4, funcionam como reservatórios de água na fase líquida e fase gasosa, onde ocorre a separação das fases, circulando a fase líquida até convertê-la em vapor que será destinado pela saída de vapor até o local desejado. Já os tubulões inferiores, indicados na Figura 4 por “Tubulão de lama”, são utilizados para descarga de fundo da caldeira, onde as partes sólidas podem ser removidas do corpo da caldeira, evitando assim desgaste (THAMIL, 2021). Estas partes sólidas podem ser provenientes de uma água de má qualidade utilizada para a geração de vapor, acumulando grande quantidade de lodo, bem como o tratamento químico que causa o desprendimento de incrustações nas paredes da caldeira.

Este trabalho é realizado em uma caldeira mista, composta por uma fornalha aquotubular, onde utiliza os tubulões de acordo com a Figura 4, realizando a troca de calor com os gases recém gerados pela queima. A disposição dos tubos deve ser bem projetada, para garantir que haja uma boa circulação do vapor dentro dos tubos, descrito detalhadamente no item 2.3.1.

Figura 4 - Representação dos Tubulões superior e inferior



Fonte: Telhado (20--)

Os tambores superiores possuem conexões para os visores de nível, válvulas de segurança, outros componentes de controle e contém tubos de ligação com o superaquecedor de vapor, para a geração de vapor superaquecido (STROBEL, 2013).

Na Figura 11, Pera (1990) apresenta formas construtivas de caldeiras aquotubulares, em que é possível notar o tubulão superior, também chamado de separador, conectado a um ou mais tambores inferiores, responsáveis pela purga de sólidos gerados pela impureza da água.

## 2.2 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

As caldeiras flamotubulares são construídas para que a água circule ao redor dos tubos e por dentro deles circulem os gases provenientes da queima, por isso recebem também o nome de fumotubulares. Os tubos são montados formando um único feixe tubular, onde são fixados aos espelhos através de solda ou a expansão de suas extremidades, processo conhecido como mandrilagem (BAZZO, 1995).

Os primeiros modelos em grande escala de produção industrial foram as caldeiras flamotubulares, que se caracterizam por uma menor exigência em respeito à condução, operação, controle, ajustes e tratamento da água alimentada nela (PERA, 1990).

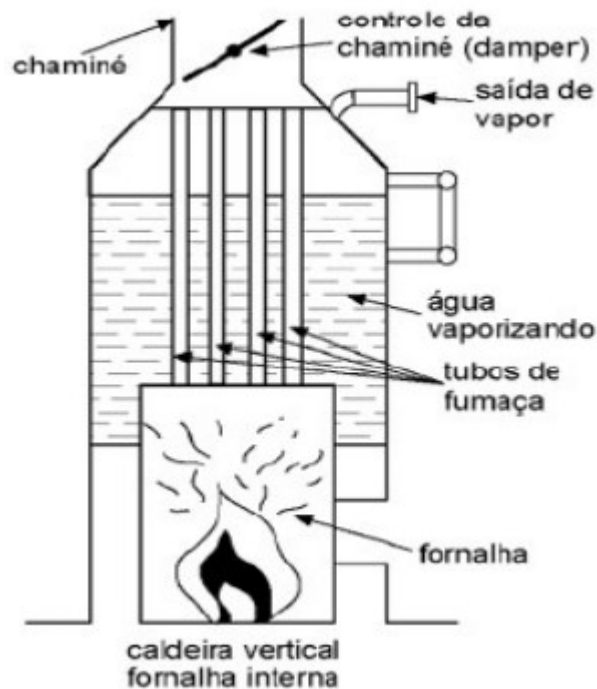
Para Bazzo (1995), esse tipo de caldeira é projetado para realizar duas ou mais passagens, as passagens são quantas vezes os gases circulam de um lado ao outro da caldeira até chegarem na chaminé onde são soltas na atmosfera. Com um maior número de passagens é possível obter um aproveitamento melhor da energia disponível nos gases. A primeira passagem se situa dentro da fornalha, onde predomina a troca térmica por radiação, já ao iniciar a segunda passagem, essa ocorrendo dentro dos tubos, predomina a troca de calor por convecção e radiação gasosa.

A concepção construtiva da caldeira é composta de um corpo cilíndrico, onde em suas extremidades são fixadas as placas planas denominadas espelhos, neles se encontram fixados os tubulões e tubos (PERA, 1990).

Este tipo de caldeira possui um baixo rendimento térmico comparada as caldeiras aquotubulares, exigem um maior espaço, porém apresentam uma construção mais simples. As caldeiras flamotubulares podem ser construídas tanto na vertical como na horizontal. As verticais, são compostas por tubos verticais apoiados em suas extremidades no espelho. Assim a fornalha interna se dispõe logo abaixo do espelho inferior, fazendo com que os gases subam fluindo pelos tubos e realizem a troca térmica (STROBEL, 2013) (Figura 5).



Figura 5 - Caldeira vertical com fornalha interna



Fonte: Strobel (2013, p. 5).

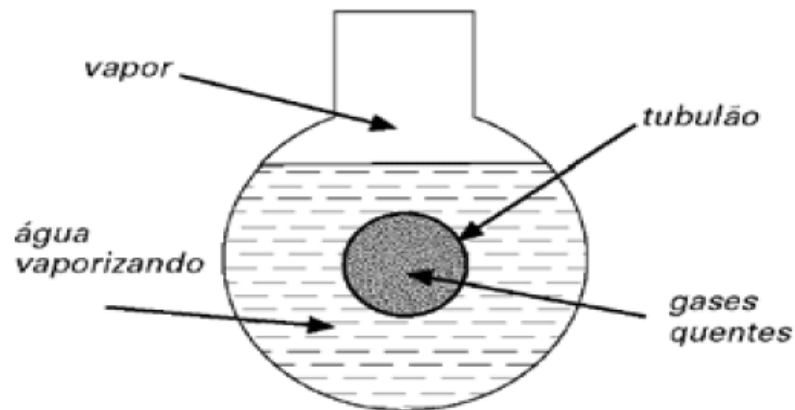
Este tipo de caldeira (Figura 5), é muito utilizada em locais que necessitam economia de espaço e não requerem uma grande quantidade de vapor, como hotéis por exemplo.

É necessário manter o nível de água para que a mesma mantenha contato com toda a superfície dos tubos, para isso é necessário a alimentação constante de água para dentro da caldeira. O rendimento deste modelo de caldeira atinge os 65%, muito baixo se comparado aos outros modelos, possui também uma superfície de troca térmica relativamente baixa, de 2 a 30 m<sup>2</sup>, atingindo pressões de até 10 kgf/cm<sup>2</sup> (PERA, 1990).

As caldeiras horizontais apresentam uma série de modelos construtivos, desde os modelos de grande volume de água até as compactas unidades modernas. Estas caldeiras apresentam tubulões internos, onde ocorre a combustão e a passagem dos gases provenientes da combustão (STROBEL, 2013).

Segundo Pera (1990), as primeiras unidades do modelo horizontal não possuíam tubos de pequeno diâmetro, apenas os tubulões que realizavam a troca térmica em sua superfície de contato. Por esse motivo e o grande volume de água que possuía, estes modelos levavam um considerável tempo para atingir a condição de operação.

Figura 6 - Caldeira Cornuália ou Cornovaglia



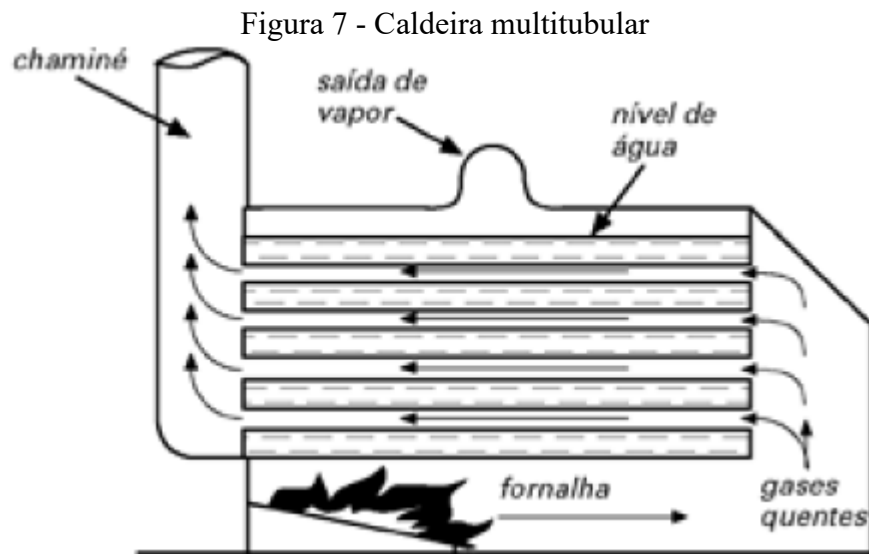
Fonte: Strobel (2013, p. 9).

O primeiro modelo, Cornovaglia (Figura 6), apresentando apenas um tubulão, e por este fato apresenta um baixo rendimento, já que a superfície de troca térmica é muito pequena e concentrada no centro da caldeira. Para obter um processo mais vantajoso, é então concebida a caldeira Lancashire, ou Lancaster, a qual possui a mesma forma da anterior, porém faz o uso de dois, ou até quatro tubulões, aumentando assim a superfície disponível para a troca de calor (PERA, 1990).

A introdução de vários tubos de diâmetro menor que o dos tubulões, deram origem ao tipo de caldeiras multitubulares, conforme demonstrado na Figura 7, realizando dois ou três passes no corpo da caldeira através dos tubos, indicado pelas setas que partem da fornalha, representando o primeiro passe e o segundo passe é realizado ao passar o vapor dentro dos tubos do espelho da caldeira, seguindo seu fluxo para a chaminé.

A fornalha externa é revestida de alvenaria e tem por vantagem a utilização de qualquer combustível para seu funcionamento. Apresenta uma capacidade máxima de 600kgv/h (seiscentos quilogramas de vapor por hora) (MARTINELLI, 2003).

As caldeiras multitubulares (Figura 7), são as unidades com diversos tubos fixados aos espelhos do corpo, não apresenta fornalha interna e por isso é construída externamente ao corpo da caldeira. Possui baixo rendimento, entre 60 e 65%, porém ainda tem bastante utilização na indústria (PERA, 1990).

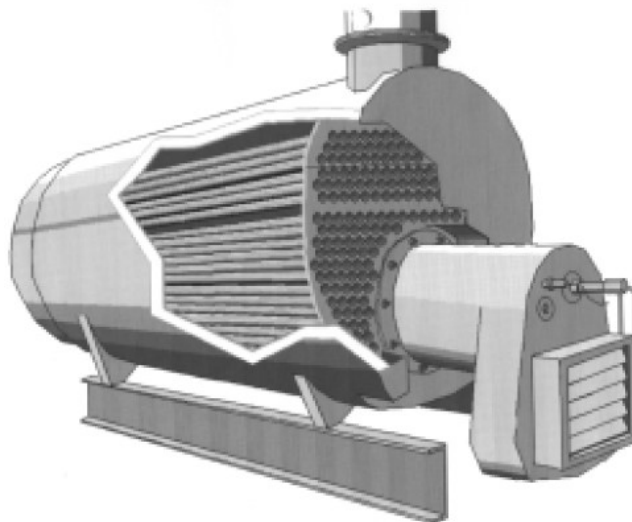


Fonte: Strobel (2013, p. 11)

A caldeira locomóvel foi modificada com o intuito de providenciar refrigeração através da água na fornalha, criando uma fornalha interna onde, a água flui por seu entorno. Essa mudança se fez pela redução do peso comparada ao refratário utilizado e por aumentar a superfície de aquecimento da água (HESELTON, 2004).

O modelo construtivo mais utilizado de todos modelos modernos, caldeira Escocesa, (Figura 8), é incorporada por um tubulão fornalha, eliminando os requisitos de uma fornalha externa. O tubulão de combustão está envolto pela água presente na caldeira, aumentando a superfície e providenciando refrigeração para a fornalha (HESELTON, 2004).

Figura 8 - Caldeira Escocesa

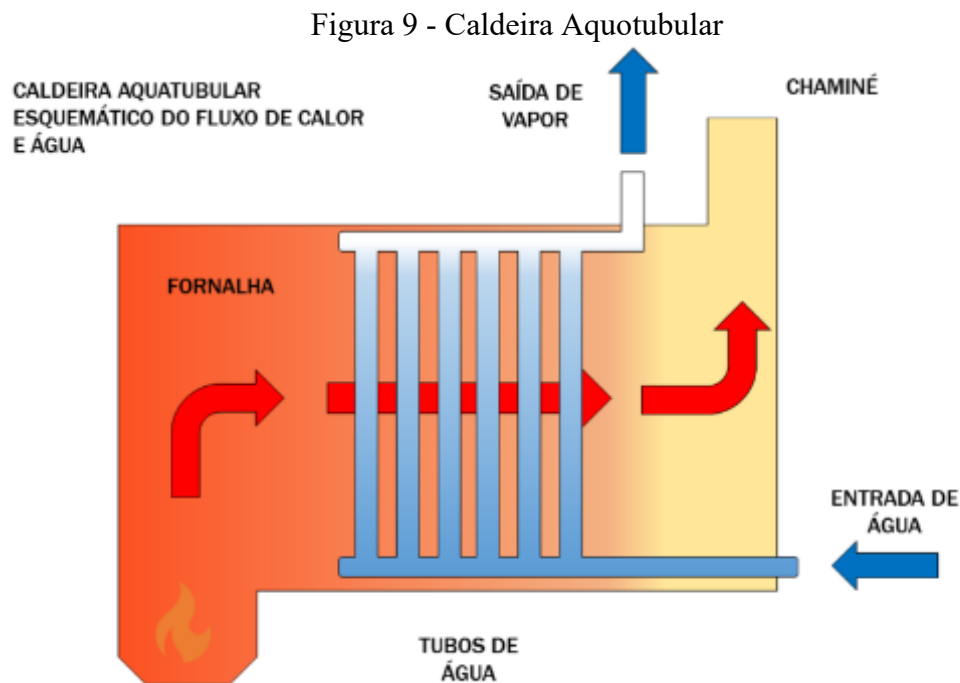


Fonte: Heselton (2004, p. 206)

### 2.3 CALDEIRAS AQUOTUBULARES

Caldeiras aquotubulares (Figura 9), se classificam assim pois os gases de exaustão fluem pela caldeira externamente aos tubos trocando calor com a água que passa por dentro dos mesmos, formando as chamadas paredes d'água (BAZZO, 1995).

Pera (1990) ressalta que só foi possível alcançar maior produção de vapor, com temperaturas e pressões mais elevadas devido as caldeiras aquotubulares, pelo fato da sua forma construtiva, onde os tubos não são atrelados ao corpo da caldeira, é possível obter um aumento na superfície de troca térmica.



Fonte: Togawa (2020, p. 1).

Genericamente uma caldeira é composta de dois tubulões ligados por tubos de menor diâmetro, formando assim a parede d'água que se localiza dentro da fornalha, conforme a Figura 9, onde a troca térmica ocorre principalmente por radiação. Já nos feixes tubulares, também denominados feixes convectivos, situados na parte posterior da caldeira, predomina a troca térmica pela radiação e convecção gasosa. Os tubos são suportados pelos tambores da caldeira, com isso a expansão e contração dos tubos ocorre livremente. A distância entre os tubos é variável e depende da forma construtiva da mesma (BAZZO, 1995).

O ar atmosférico passa pelo pré-aquecedor, impulsionado por um ventilador, assim é aquecido e direcionado a fornalha onde em conjunto com o material combustível geram a

combustão. Os gases quentes produzidos na fornalha circulam pelo corpo da caldeira até o momento que são lançados para a atmosfera pela chaminé, este fenômeno se denomina tiragem. No seu trajeto pela caldeira os gases quentes realizam a troca térmica aquecendo o economizador, vaporizando a água na parede d'água e transformando o vapor saturado em superaquecido no superaquecedor (MARTINELLI, 2003).

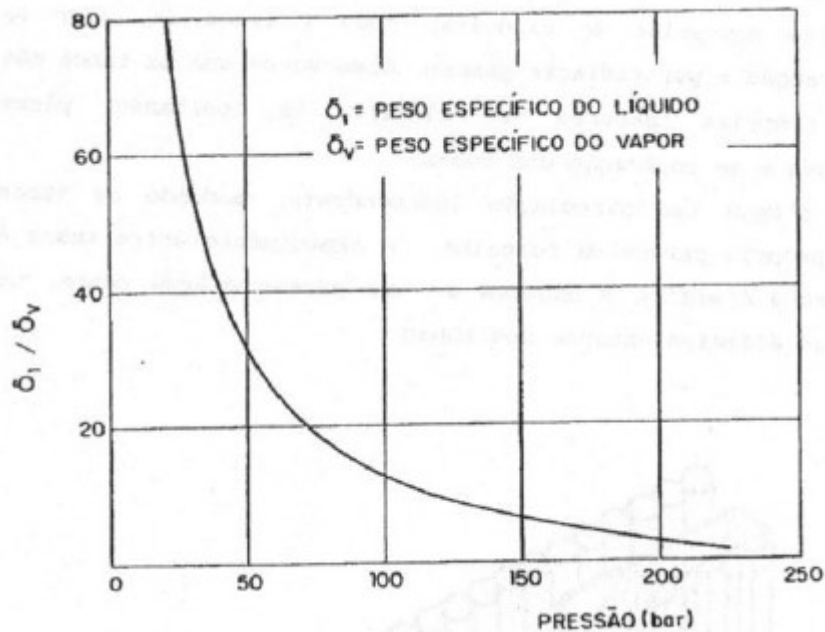
A produção de vapor nestas caldeiras tem capacidade ampla de 100 kgv/h até altas taxas de 600 a 750 tv/h, a pressão variando entre 150 e 200 kgf/cm<sup>2</sup>, a temperatura oscila de 450 até 500 °C. É possível encontrar também unidades que operam com pressões críticas, 225 atm, e supercríticas, operando a 350 atm. O valor usual de capacidade para uma caldeira compacta é de 120 tv/h (PERA, 1990).

Os tubos presentes nas caldeiras precisam de constante resfriamento, pois o aço que os constitui perde suas propriedades mecânicas à medida que a temperatura limite é atingida, e em regiões onde estes componentes estão localizados a temperatura ultrapassa os limites do material, tornando assim a circulação de água pelos tubos imprescindível (PERA, 1990).

Pera (1990) classifica as caldeiras aquotubulares em três grupos. O primeiro grupo contempla as caldeiras de tubos retos, sucedida das flamotubulares, trabalhando com pressões máximas de 45 kgf/cm<sup>2</sup> e com capacidade de 3 a 30 tv/h. O segundo grupo inicia a utilização de tubos curvados, surgindo variadas concepções, apresentando um único tambor até a utilização de quatro dos mesmos, podendo se dispor transversalmente ou longitudinalmente ao plano dos tubos. A terceira categoria surgiu como um aperfeiçoamento das categorias anteriores, onde a circulação de vapor e água se dá de forma natural, dado que a diferença de peso específico da água e das bolhas de vapor é quem realiza a circulação dentro dos tubos e tambores, gerando assim um processo com algumas deficiências comparado com o terceiro grupo. Este terceiro grupo é conhecido como caldeiras de circulação positiva.

A circulação do vapor e água dentro dos tubos e tambores é causada basicamente pela diferença de peso específico do vapor, gerado na parte inferior dos tubos, e da fase líquida da água presente nos tubos, fazendo com que o vapor se desloque em direção ao tambor principal, local onde é realizada a separação do vapor e do líquido. Conforme a Figura 10, esta relação é prejudicada à medida que a pressão de trabalho aumenta, fazendo com que a circulação não ocorra da forma devida (BAZZO, 1995).

Figura 10 - Relação entre peso específico da água em forma líquida e vapor, em função da pressão de trabalho



Fonte: Bazzo (1995, p. 77).

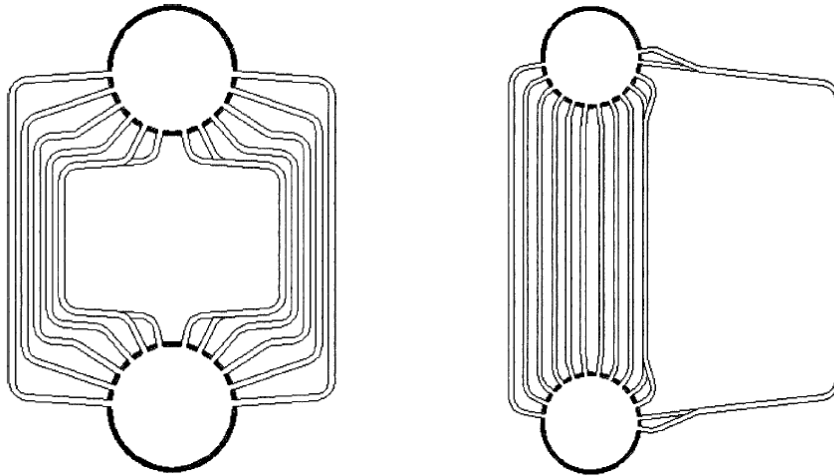
Tem-se então três formas de circulação em caldeiras aquotubulares.

### 2.3.1 Circulação Natural

A circulação natural se dá pela ebulição da água, em que o vapor, mais leve que a água sobe pelos tubos em contato com a fornalha ou gases resultantes, e por isso em alta temperatura, até o tambor superior. O volume deixado pelo vapor é preenchido pelo líquido proveniente dos tubos mais frios. Dependendo da sua forma construtiva, a água em estado líquido pode passar por tubos externos ao corpo principal da caldeira (BAZZO, 1995) (Figura 11).

Estes tubos isolados dos gases quentes, são chamados de tubulações de alimentação, ou de descida de água, já aqueles que ficam expostos a troca térmica contínua recebem a nomenclatura de vaporizadores ou tubos de subida, do inglês *DownComers* e *Risers* respectivamente (PERA, 1990).

Figura 11 - Demonstração de circulação natural, em formas construtivas do tipo “O” (esquerda) e tipo “D” (direita)



Fonte: Heselton (2004, p. 213).

Pera (1990) contempla em sua obra, que é possível notar em um único tubo, fluxos em sentidos opostos, ascendente na sua periferia, e descendente na parte mais próxima ao centro, provocando o fenômeno de “Free-Level”, onde a circulação é paralisada. Visto que a circulação depende da diferença de peso específico entre as fases.

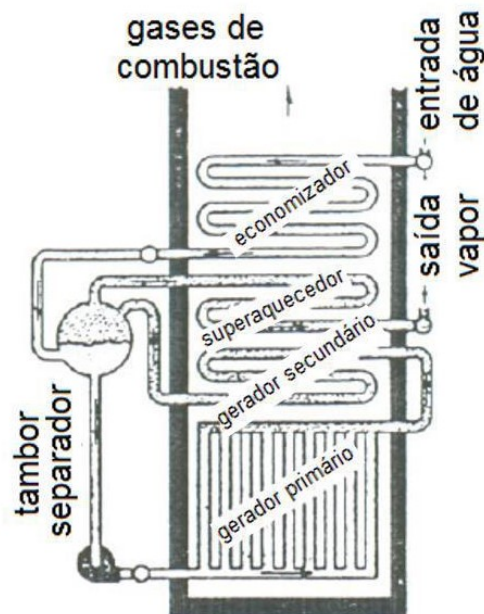
A circulação natural é a forma mais utilizada nas caldeiras aquotubulares, porém abrange em sua maioria unidades menores, podendo atender os requisitos em caldeiras de maior porte, com pressões da ordem de 160 bar. Garantida pelos feixes tubulares e paredes d’água, conectados aos tambores ou tubulões, por solda ou pela expansão de suas extremidades, processo este mais utilizado e que recebe o nome de mandrilagem (BAZZO, 1995).

### 2.3.2 Circulação Assistida

Comumente construídas com apenas um tambor conectado à parede d’água, as caldeiras de circulação auxiliada, acelerada ou assistida, possui o mesmo princípio da circulação natural, porém se faz o uso de bombas para realizar a movimentação da água no tambor (Figura 12), onde a bomba força o fluido em direção ao gerador primário. Estas bombas de recirculação são projetadas para o trabalho com água em temperaturas elevadas, com alta vazão e uma baixa variação de pressão (BAZZO, 1995).

A faixa de operação da bomba é a mesma do sistema. Ela injeta novamente a água no circuito, mas com pressão superior à da caldeira, de 2 a 3,5 kgf/cm<sup>2</sup>. Este aumento na pressão é para superar as perdas de carga devido a trajetória da tubulação, com o uso de aproximadamente 0,6% da energia gerada pela unidade (PERA, 1990).

Figura 12 - Caldeira de La-Mont, circulação assistida



Fonte: Adaptado de Pera (1990).

A grande vantagem da circulação assistida é a alta eficiência térmica do sistema, bem como a rápida alcance da operação em regime permanente. Isso ocorre, pois a bomba de recirculação é capaz de extinguir os problemas originários da circulação natural, possibilitando a redução do diâmetro de tubos, assim aumentando a eficiência térmica, diminuindo a quantidade de material necessário para construção e reduzindo o espaço ocupado (BAZZO, 1995).

### 2.3.3 Circulação Forçada

Criadas para as usinas termoeletricas, as caldeiras de circulação forçada ou passe forçado não apresentam recirculação de água, a água é forçada pela bomba de alimentação por um único caminho na tubulação (BAZZO, 1995).

Analogamente à circulação assistida, conforme Bazzo (1995), a forçada não necessita de tubos com diâmetro grande, e não encontra problemas com relação ao sentido de fluxo e inclinação do feixe tubular. Esta forma não possui tambor separador, somente quando o trabalho é inferior à pressão crítica e são utilizados para evitar a formação de sílica, separando-a do vapor que será liberado.

Pera (1990) apresenta que este modo de funcionamento é conhecido como “*Once through boiler*”, onde a bomba injeta exatamente o quanto de vapor irá produzir. Tem como vantagens a redução do espaço utilizado, diminuição de peso, não forma incrustações dentro da

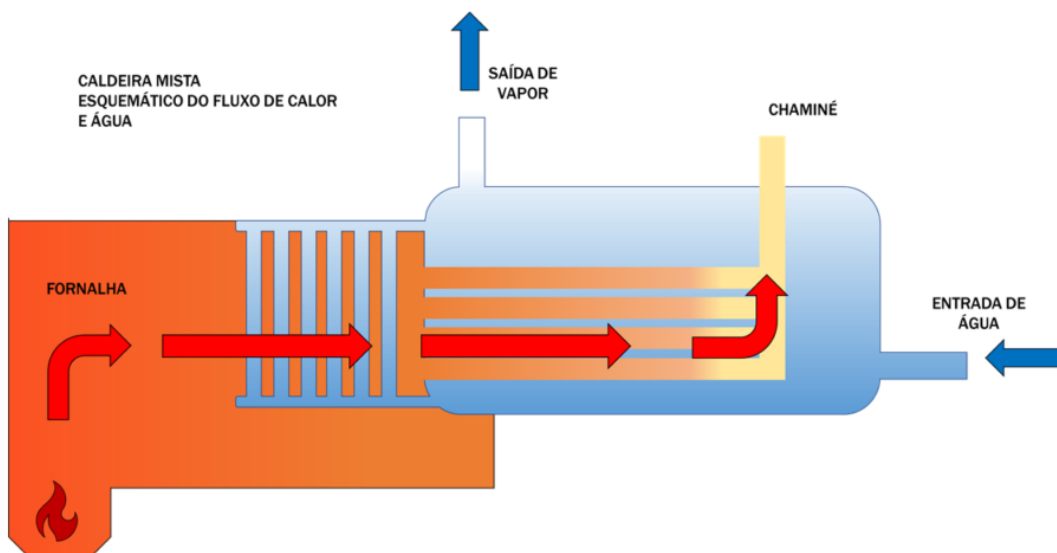


tubulação, a geração de vapor é imediata, fornecem vapor saturado seco ou superaquecido quando faz a utilização de um superaquecedor.

## 2.4 CALDEIRAS MISTAS

A caldeira mista tem essencialmente o corpo de uma caldeira flamotubular, ou seja, a passagem dos gases é no interior dos tubos e sua fornalha é revestida com tubos de água no estilo da aquotubular (Figura 13). Este modelo foi desenvolvido para viabilizar a queima de combustíveis sólidos em caldeiras de capacidade baixa, que com a utilização da fornalha comporta um maior volume de queima, assim facilita a queima de combustíveis maiores como no caso de lenha, cavaco e biomassas em geral (BAGGIO, 2018).

Figura 13 - Caldeira Mista



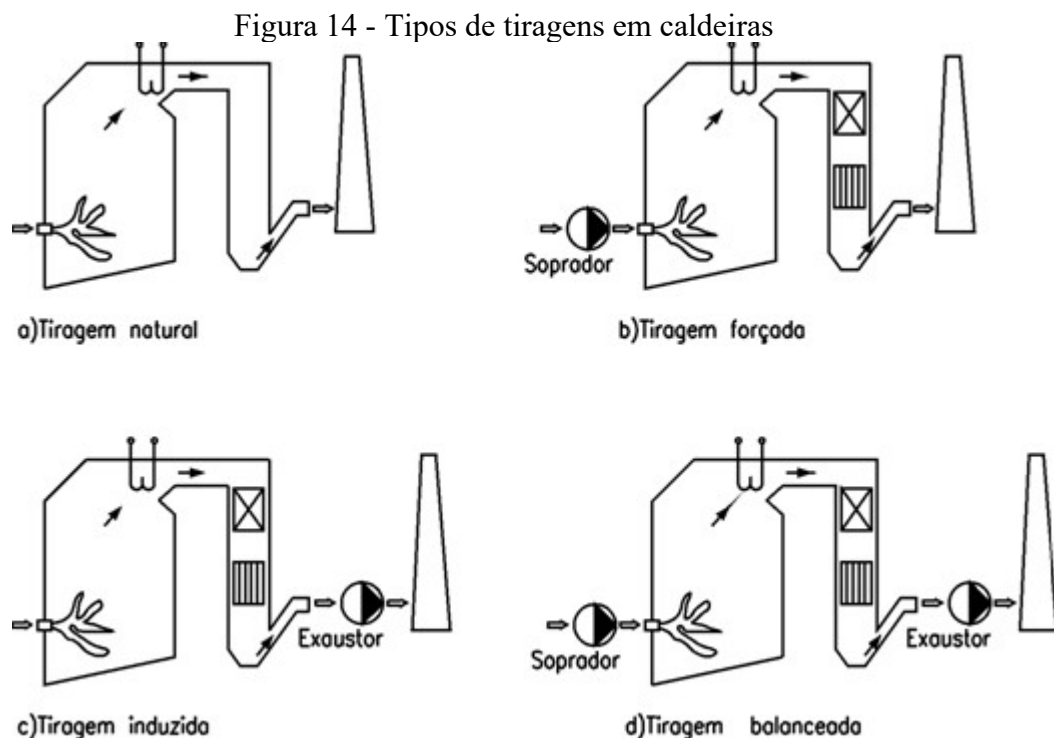
Fonte: Togawa (2020, p. 1).

Apesar de não possuir todas as vantagens da caldeira aquotubular, como a maior eficiência térmica e a segurança, a caldeira mista possui a vantagem de aproveitar a radiação da queima do combustível para realizar a troca térmica com a água que circula pelos dutos na câmara de combustão. Outra vantagem é a utilização de materiais de menor custo e abundância em determinados locais (lenha, cavaco e bagaço) (LUFT, 2017).

## 2.5 SISTEMA DE TIRAGEM DA CALDEIRA

Para Pera (1990), a tiragem é o processo que proporciona simultaneamente a introdução do ar na fornalha e a exaustão para a atmosfera dos gases resultantes da combustão que circulam por toda caldeira (Figura 14).

Os ventiladores centrífugos atuam em conjunto com o efeito de sucção da chaminé para garantir a movimentação do ar na entrada caldeira, bem como os gases de combustão na sua exaustão (BAZZO, 1995).



Fonte: Zottis e Pagnossin (2008, p. 7).

A tiragem deve superar algumas resistências impostas pelo processo de escoamento dos fluídos, a passagem do ar atmosférico direto do meio ambiente para o interior da fornalha, auxiliar na mistura de ar e combustível para ocorrer a combustão da melhor forma e o escoamento dos gases provenientes da combustão em todo seu caminho até a atmosfera (PERA, 1990).

### 2.5.1 Tiragem Natural

Constituindo-se da instalação de uma chaminé logo após a caldeira, a tiragem natural, representada pela Figura 14a, proporciona o escoamento dos gases e a inserção de ar no interior

da câmara de combustão, este fenômeno ocorre pela diferença de massa específica entre o topo e a base da chaminé. A temperatura é quem altera o volume dos gases gerando a diferença de pressão e assim garantindo o escoamento (PERA, 1990).

A câmara de combustão trabalha sempre com pressão negativa, garantindo a entrada de ar e a exaustão dos gases exclusivamente pelo efeito chaminé (BAZZO, 1995), que consiste na grande diferença de massa específica dos gases de combustão e o ar atmosférico, gerando uma força de empuxo na chaminé que empurra os gases para fora resultando na pressão negativa dentro da caldeira. Atualmente há poucas caldeiras onde as características de construção não impactem o fluxo de gases com grandes perdas de carga.

Pera (1990) comenta que as perdas de carga durante o percurso de fluidos gasosos têm duas origens. As perdas distribuídas são originadas do atrito causado pelo escoamento dos gases contra as superfícies das paredes metálicas e refratárias. Já as perdas localizadas são resultantes de restrições ou aumentos abruptos nas secções de passagem bem como mudanças repentinas de direção do fluido.

Implantou-se a tiragem artificial ou mecânica para reduzir as perdas de carga, bem como obter uma otimização do espaço utilizado para a construção da caldeira e controlar o processo de tiragem de forma precisa.

A tiragem artificial se particiona em três subgrupos, a tiragem forçada (Figura 14b), induzida (Figura 14c) e balanceada (Figura 14d).

### **2.5.2 Tiragem Forçada**

Operando com o auxílio de um ou mais sopradores forçando a entrada de ar na caldeira, a tiragem forçada gera pressão positiva no interior da caldeira visando extrapolar as perdas de carga e impulsionar os gases em direção à chaminé. A chaminé continua tendo uma função no processo, porém atuando apenas como direcionador dos gases e não mais como fator principal da tiragem, podendo assim ser reduzida em termos dimensionais, e consequentemente financeiros (BAZZO, 1995)(Figura 14b).

A pressão fornecida pela máquina sopradora faz com que os fluidos dentro da caldeira sejam forçados a atravessar por todo circuito. Este modelo opera em pressão positiva ou pressurizada na câmara de combustão, necessitando uma estanqueidade perfeita para evitar quaisquer fugas da mistura de gases (PERA, 1990).

### 2.5.3 Tiragem Induzida

Na literatura, Bazzo (1995) comenta que ao operar com a adição de um exaustor na base da chaminé, a tiragem induzida trabalha com pressão negativa dentro da câmara de combustão, porém apresenta uma incapacidade de manter o controle de pressão, bem com a distribuição de forma regular no interior da câmara.

O exaustor é responsável por aspirar tanto os produtos de combustão como o próprio ar necessário para a combustão, desde o ponto de injeção do ar até a descarga na chaminé (Figura 14c).

### 2.5.4 Tiragem Balanceada

Fazendo o uso de ventiladores e exaustores, a união dos dois modos anteriores é denominada tiragem balanceada ou mista (Figura 14d). É o método mais usual entre as caldeiras de combustível sólido, tanto pelo aumento de eficiência na combustão devido ao turbilhonamento causado pelo sopro forçado do ar realizado pelo soprador, bem como pela combinação do exaustor com a chaminé, superando as perdas de trajeto dos gases de combustão (PERA, 1990).

Bazzo (1995) complementa que a pressão do interior da câmara de combustão é negativa em condições normais, variando entre -1 e -10 Pa (Pascal), diminuindo na medida em que os gases fluem para a chaminé.

## 2.6 SEGURANÇA EM CALDEIRAS

São diversos os riscos gerados pela utilização de caldeiras no processo produtivo das empresas, como o risco de explosão, por se trabalhar com elevadas pressões. O choque elétrico também é um risco presente, tal qual incêndios, quedas e intoxicações (GYURKOVITS, 2004).

Os riscos relacionados às caldeiras variam dependendo principalmente de como ela é operada e pelo seu tempo de utilização. A falta de manutenção, aliada a operação falha e um tratamento inadequado da água utilizada no seu processo são responsáveis pela maioria dos acidentes em caldeiras (ALMEIDA, 2018).

Gyurkovits (2004) reforça os riscos de explosão, devido ao grau de violência com que ocorrem gerando consequências catastróficas pela alta liberação de energia causada, atingindo

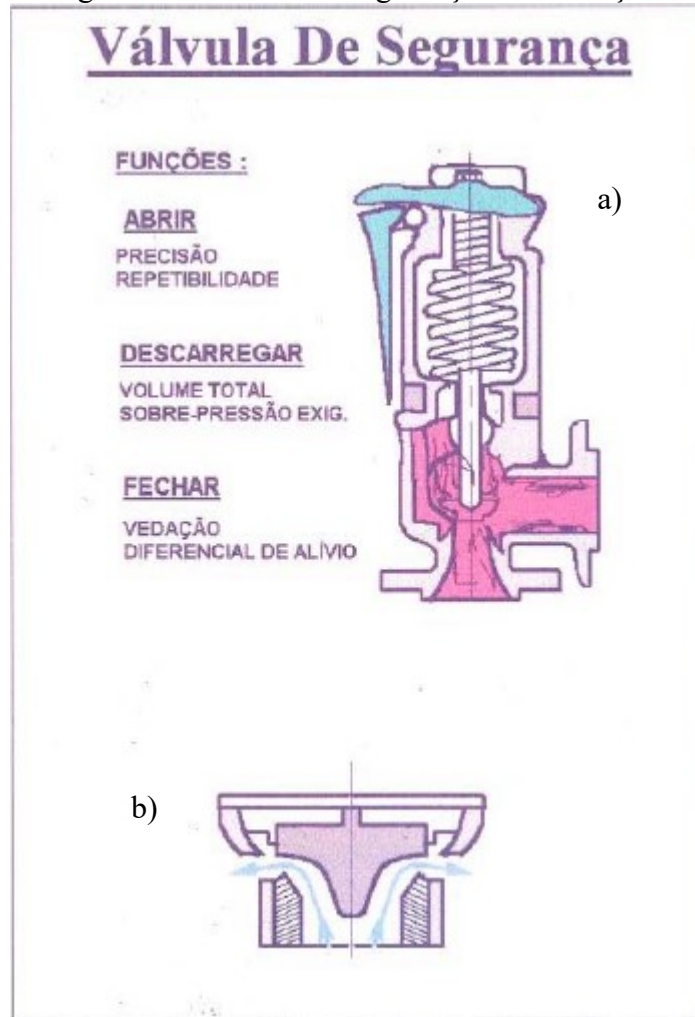
não apenas quem trabalha no local, mas sim devastando todo o seu redor. Deve-se manter o controle de forma contínua, pois este risco está presente de forma ininterrupta.

### **2.6.1 Dispositivos de Segurança**

Os dispositivos de segurança instalados nas caldeiras têm por objetivo evitar as falhas decorrentes do funcionamento, a NR-13 (BRASIL, 2019) contempla também que a falta de um destes dispositivos se configura em risco grave. As válvulas de segurança são responsáveis pela liberação de pressão assim que se atinge a pressão ajustada de abertura das mesmas, podendo ser menor ou igual a Pressão Máxima de Trabalho Admissível.

A Figura 15a traz um esboço do interior de uma válvula, regulada para manter a pressão interna controlada, sempre dentro do permitido. Assim que esta pressão é extrapolada a mola é comprimida e a pressão é regulada pela vazão do vapor conforme apresentado na Figura 15b.

Figura 15 - Válvula de segurança e suas funções



Fonte: Gyurkovits (2004, p. 51).

As válvulas são dispositivos que devem atuar em caso de falha do sistema de combustão, evitando o aumento excessivo da pressão de trabalho da caldeira.

Os manômetros permitem a leitura imediata da pressão efetiva da caldeira, permitindo o operador identificar de forma rápida alguma alteração (Figura 16).

Uma forma de controlar a pressão de trabalho é através do controle do sistema de alimentação de combustível por meio de dispositivos relacionados à leitura da pressão de trabalho (BAZZO, 1995).

Figura 16 - Garrafa, Visor do nível de água e Manômetro



Fonte: O Autor (2022).

Segundo Bazzo (1995), o nível de água pode ser regulado de diversos modos. Para caldeiras de grande porte são utilizados reguladores pneumáticos ou elétricos, nas menores é mais comum o controle através de eletrodos (Figura 16). Os eletrodos são dispostos em diferentes tamanhos dentro da garrafa de nível, dois maiores, um intermediário e um menor. O eletrodo menor é responsável por comandar o nível superior de água no corpo da caldeira, cuja posição está indicada pela letra “D” (Figura 16), o nível inferior é comandado pelo eletrodo intermediário (Letra “L”), o terceiro desativa a caldeira caso ocorra a falha, acionando um alarme indicado pela letra A. O quarto eletrodo é responsável pela energização do sistema de controle, que pela passagem de corrente elétrica, o circuito se fecha, energizando assim os relés.

Gyurkovits (2004, p. 59) esclarece que “Quando não aplicados corretamente os princípios de manutenção preventiva e corretiva das caldeiras, e não seguem os mesmos rigores das normas de construção, os riscos de acidentes de operação são fortemente agravados.”

### 3 MANUTENÇÃO

A manutenção sempre esteve presente na história, embora tenha sido reconhecida por manutenção apenas no século XVI na Europa. A medida que surgiram os técnicos em montagem e assistência de relógios mecânicos, durante a revolução industrial começou a ganhar força e na Segunda Guerra Mundial foi estabelecida como necessidade essencial. Atualmente as empresas correm contra o tempo, pois com a concorrência o mercado exige prazos de entrega cada vez mais curtos, bem como a qualidade do produto em um patamar muito elevado e com isso surge a preocupação de se prevenir contra as falhas de máquinas e equipamentos (MORO, 2007).

Segundo Bertsche (2008), a manutenção engloba métodos para determinar e avaliar o estado atual, assim como preservar e reestabelecer o estado nominal de máquinas, equipamentos e componentes. Estes métodos podem ser divididos em preventivos e corretivos. Os métodos de manutenção incluem serviço, inspeção, revisão e reparo.

A implantação de programas de manutenção é de suma importância, pois máquina e equipamentos parados ou com defeitos geram muitos prejuízos. Dos muitos prejuízos, temos a interrupção do processo produtivo, o atraso na entrega dos produtos e o aumento nos custos da empresa. Consequentemente clientes insatisfeitos com perda de mercado e financeira (MORO, 2007).

Dhillon (2006, p. 3), define manutenção como: “Todas ações necessárias para manter um item ou equipamento, ou restaurá-lo, a uma condição específica [...]”.

Para Moro (2007), a manutenção é o conjunto de cuidados técnicos imprescindíveis para o correto funcionamento e preservação de máquinas e equipamentos. Dentre estes cuidados é possível citar a lubrificação, a substituição de peças desgastadas e de itens no período estabelecido pelo seu fabricante como forma de conservar o equipamento.

#### 3.1 MANUTENÇÃO CORRETIVA

A manutenção corretiva é o tipo de manutenção não planejada, requer ação imediata e é realizada por conta de uma falha ou deficiência encontrada durante manutenções preventivas ou para retornar o equipamento a sua funcionalidade (DHILLON, 2006).



A manutenção corretiva é muitas vezes denominada de reparo. Segundo Gulati (2009), é uma ação que restaura a boa condição de trabalho de um ativo que falhou ou parou de funcionar. Pode ser classificada mais profundamente em tais categorias:

- a. Manutenção corretiva reativa: é uma atividade que age após a falha de um determinado equipamento. Este é o tipo de manutenção evitada pelas empresas, pois o tempo de reparo interfere na condução normal da produção, resultando em perdas financeiras.
- b. Manutenção corretiva proativa: ocorre quando se deixa uma estrutura preparada para o caso de o sistema técnico falhar. Envolve procedimentos de manutenção, peças sobressalentes em estoque, identificação dos fornecedores, e os meios de contato, de peças que não se encontram em estoque e a capacitação de uma equipe de manutenção para os procedimentos criados.

Basicamente cinco passos podem descrever a manutenção corretiva. O primeiro passo é a percepção e o reconhecimento de uma falha presente no sistema ou equipamento. O segundo passo é a localização da falha, seguido então de um diagnóstico dentro do equipamento para identificar a parte que causou a falha do conjunto. O quarto passo contempla a troca ou reparo da peça avariada, e por fim o quinto passo, uma checagem e o retorno de trabalho normal do equipamento (DHILLON, 2006).

### 3.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA POR TEMPO (MANUTENÇÃO PROGRAMADA)

Segundo Dhillon (2006), a manutenção programada, realizada pelo grupo de manutenção, é o cuidado e manutenção dos equipamentos por meio de inspeção, detecção e correção das falhas previamente seu agravamento, ou até mesmo antes de acontecer, por cumprirem com um procedimento de tempo pré-estabelecido.

Considerada o estágio inicial das manutenções programadas, ela segue um padrão previamente esquematizado. Com a manutenção preventiva por tempo é possível reduzir custos, diminuindo o número de peças sobressalentes e reduzindo paradas inesperadas. A melhora de qualidade é percebida facilmente ao manter as máquinas em bom estado e eficientes, além disso é notável o aumento de produção da mesma (MORO, 2007)

A manutenção preventiva compreende ações realizadas em uma máquina ou equipamento seguindo um cronograma baseado no tempo, tempo de máquina ativa ou número

de ciclos da mesma. A manutenção preventiva por tempo visa aumentar a vida útil do maquinário e evitar manutenções corretivas reativas e proativas, por exemplo, com ações de limpeza, ajustes, troca de componentes e lubrificação (GULATI, 2009).

O manter do bom estado da máquina impacta positivamente, além da vida útil da mesma, a questão de segurança em relação a redução de acidentes de trabalho e o cuidado com o meio ambiente, diminuindo a poluição gerada pelo equipamento (MORO, 2007).

Para Dhillon (2006), a inspeção, calibração, teste, ajuste, manutenção periódica, instalação e alinhamento são os elementos que compõem a manutenção preventiva. A inspeção de componentes mensura suas características mecânicas, elétricas e físicas, comparando-as com os padrões do produto de fábrica. A calibração é o ajuste realizado para eliminar os erros de precisão do equipamento. Os testes são realizados para detectar qual o nível de desgaste do equipamento, e assim ajustes são feitos para que opere próximo de seu regime ótimo. A manutenção periódica, como lubrificação e limpeza, auxilia na diminuição de falhas induzidas por maus cuidados. A instalação consiste na troca de componentes com vida útil perto do seu limite, e o alinhamento contempla as mudanças nos elementos variáveis da máquina a fim de obter um aprimoramento em seu desempenho.

O principal motivo de se ter um programa de manutenção preventiva por tempo é a garantia de que o ativo manterá a sua capacidade de produção, sem que ocorram falhas prematuras, nem acarretar paradas de produção, pois a mesma pode ser realizada no período em que a produção está parada. É perceptível a redução em geral nos custos de manutenção por conta de o ativo não apresentar falhas como anteriormente sem um plano de manutenção preventiva, aumentando a disponibilidade do equipamento. Outro fator que afeta os custos é a geração de refugos e retrabalhos, no qual o plano de manutenção preventiva o reduz ao manter uma condição melhor do equipamento (GULATI, 2009)

### 3.3 MANUTENÇÃO PREVENTIVA POR CONDIÇÃO (MANUTENÇÃO PREDITIVA)

Para Gulati (2009), a manutenção preventiva por condição é realizada no predicativo de elencar e avaliar as condições de um equipamento através de monitoramento periódico ou constante.

A manutenção preventiva consiste em uma fase avançada de um plano global de manutenção. É baseada no conhecimento da situação em que o componente se encontra. Ela

prediz as condições de funcionamento de um equipamento, através do monitoramento constante das mesmas. Permitindo assim uma operação contínua o mais longínqua possível (MORO, 2007).

O principal objetivo desta manutenção é realizá-la no período em que seu custo seja o mais baixo possível e antes da falha ocorrer. Este tipo de manutenção, tipicamente, contempla o controle estatístico e análise de tendências futuras das condições do equipamento através da obtenção dos dados adquiridos ao longo das atividades da máquina. Encontrando assim o ponto ideal para o melhor custo benefício de manutenção (GULATI, 2009).

Moro (2007) apresenta os objetivos da manutenção preditiva, a determinação antecipada de necessidade de manutenção em determinado componente ou máquina. O controle das condições visa também eliminar desmontagens de inspeção sem necessidade, aumentando assim o tempo de disponibilidade do equipamento. Com estes objetivos em funcionamento é certo que a confiabilidade do equipamento será maior, prevendo interrupções de trabalho para o cuidado dos equipamentos.

Se diferencia deste modo da manutenção programada, que visa evitar as falhas com recorrência em datas previamente agendadas. Já a manutenção preditiva através das análises de condições possibilita a atuação precisa no momento determinado em que ela deve acontecer.

Algumas formas de aplicação da manutenção preditiva são: a análise de vibrações, a análise do óleo, a termografia, o ultrassom, a elétrica e desempenho operacional (GULATI, 2009).

### 3.4 ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHA (*FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS - FMEA*)

Desenvolvida nos Estados Unidos, em meados do século XX, a metodologia *FMEA* permite a identificação de modos de falha que venham prejudicar o funcionamento normal de um produto, processo ou equipamento. Ações preventivas, ou até mesmo corretivas, são tomadas visando a redução de ocorrência do modo de falha identificado anteriormente (RODRIGUES *et al.*, 2010).

*FMEA* é um método de análise de um ativo, processo ou produto, que visa determinar modos potenciais de falha e efeitos causados por elas, para então encontrar soluções mitigadoras priorizando os modos de maior risco (GULATI, 2009).

*FMEA* é um método de análise de confiabilidade, onde é possível identificar os modos de falha de um sistema, modos de falha que são basicamente as maneiras com que pode ocorrer uma interrupção na funcionalidade normal de determinado equipamento, componente ou sistema (BRAAKSMA; KLINGENBERG; VELDMAN, 2013).

É necessário criar uma equipe multifuncional para compor o grupo do *FMEA*. Como a direção da empresa, engenharia, qualidade e produção, para obter o maior número de informações e abranger todos os níveis de atuação e conhecimento do processo ou produto (RODRIGUES *et al.*, 2010).

McDermott; Mikulak; Beauregard (2008) no livro “*The basics of FMEA*” contempla que esta ferramenta da qualidade, ao contrário de muitas outras, não exige a utilização de estatísticas complicadas em sua implementação, e ainda assim é capaz de resultar em grandes economias para a empresa enquanto reduz também o potencial do custo de um processo ou produto ineficiente. Os autores ainda enfatizam que a *FMEA* padroniza a abordagem em relação a análise de modos de falha, proporcionando uma linguagem universal que pode ser utilizada por qualquer empresa.

Segundo Dias *et al.* (2013), existem duas abordagens utilizadas para a condução de uma *FMEA*: a funcional e a estrutural. A *FMEA* funcional, é voltada para a funcionalidade do item, ou seja, se o item está realizando sua função ou não. Já a abordagem estrutural tem como modo de falha os aspectos específicos do equipamento ou componente, como por exemplo a ruptura de um eixo ou o desgaste do mesmo.

Estas duas abordagens se diferenciam pelo quão minuciosa é a análise. A abordagem funcional tem a característica de ser mais abrangente, com o modo de falha focado no cumprimento ou não da função do componente. A abordagem estrutural se caracteriza como mais aprofundada onde o modo de falha é algo que impede a funcionalidade do componente. Desta forma, geralmente a causa em uma abordagem funcional é o modo de falha em uma abordagem estrutural, como demonstrado por Dias *et al* (2013) (Figura 17).

Figura 17 – FMEA Funcional (a), FMEA estrutural (b)

## a) FMEA funcional

Item	Função	Modo de falha	Efeito	Causa
Anel de vedação	Vedar	Não veda	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perda total – caso haja rompimento (explosão) da câmara – ou parcial do SF6.</li> <li>• Redução da pressão interna do SF6.</li> <li>• Abertura de arco elétrico nas partes condutoras internas,</li> <li>• Aumento dos danos causados pelo arco elétrico durante a abertura ou o fechamento do disjuntor.</li> <li>• Trip do disjuntor (com abertura do disjuntor),</li> <li>• Impossibilidade de fechamento do disjuntor.</li> <li>• Danos a pessoas e equipamentos próximos caso haja explosão.</li> </ul>	Deformação permanente

## b) FMEA estrutural

Item	Função	Modo de falha	Efeito	Causa
Anel de vedação	Vedar	Deformação permanente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perda total – caso haja rompimento (explosão) da câmara – ou parcial do SF6.</li> <li>• Redução da pressão interna do SF6.</li> <li>• Abertura de arco elétrico nas partes condutoras internas,</li> <li>• Aumento dos danos causados pelo arco elétrico durante a abertura ou o fechamento do disjuntor.</li> <li>• Trip do disjuntor (com abertura do disjuntor),</li> <li>• Impossibilidade de fechamento do disjuntor.</li> <li>• Danos a pessoas e equipamentos próximos caso haja explosão.</li> </ul>	Pressão de aperto excessiva Temperatura excessiva Material do anel inadequado Envelhecimento

Fonte: Dias *et al.* (2013, p. 120)

Os autores também frisam a importância de, independentemente do tipo de abordagem, se ter a função do componente bem exposta, pois a análise do modo de falha se inicia a partir desta informação. Os efeitos da mesma forma, independente da abordagem, devem estar identificados dentro do escopo da análise feita (DIAS *et al.*, 2013).

### 3.4.1 Risco de falha e o Número de prioridade de risco (NPR)

O risco de falha é a chance com que a falha pode ocorrer, para isso tem-se três fatores utilizados para a determinação do risco de falha: severidade, ocorrência e dificuldade de detecção. A severidade avalia o nível das consequências causadas pela falha, a ocorrência determina a frequência com que a falha ocorre, e a detecção a probabilidade de a falha ser

detectada antes do impacto causado pela falha ser notado (MCDERMOTT; MIKULAK; BEAUREGARD, 2008).

Para classificar a detecção, Rodrigues *et al.* (2010), avalia a capacidade do controle detectar uma falha já existente. Neste sentido, são propostos dez níveis de classificação, sendo os níveis 1,2 e 3, como níveis referentes à sistemas a prova de falhas (*Poka Yoke*). À medida que o nível de classificação aumenta, menores são as chances de detecção, onde o nível 9 representa uma difícil detecção do modo de falha, e o nível 10, que representa o mais crítico onde a detecção não é possível ou não é realizado nenhum tipo de controle.

O número de prioridade de risco é obtido a partir da multiplicação dos três fatores, “Severidade x Ocorrência x Detecção = NPR”, será definido para cada modo de falha potencial e efeito. O valor do NPR varia de 1 a 1000 e é utilizado para elencar em quais modos de falha devem ser priorizadas as ações corretivas para sua redução. Os números mais elevados de NPR são priorizados, do mesmo modo deve ser dedicado uma atenção especial para potenciais modos de falha com valores de severidade 9 ou 10 (MCDERMOTT; MIKULAK; BEAUREGARD, 2008).

### 3.4.2 Etapas de um FMEA

De forma resumida o desenvolvimento do processo FMEA, após a formação da equipe com suas determinadas funções, se inicia na identificação de potenciais modos de falha em um processo ou produto, estuda-se os efeitos e as consequências da falha, as causas da mesma e a frequência com que ocorrem, a aplicação de controles de prevenção e detecção, assim identificados os níveis de severidade, ocorrência e detecção é possível obter o número de prioridade de risco (NPR) e assim será possível elencar os modos de falha mais críticos para o processo ou produto (AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG), 2008).

Segundo McDermott; Mikulak; Beauregard (2008), após a realização das ações elencadas pela equipe responsável pela FMEA, deve-se então calcular novamente o NPR, denominado NPR resultante, o qual indicará se as ações foram eficazes ou não. A melhoria deve ser mantida até um valor aceitável de NPR ser alcançado.

### 3.4.3 FMEA e requisitos de normas

A ISO/TS 16949 é o padrão de qualidade para a indústria automotiva, baseada na norma ISO 9000. Têm por objetivo desenvolver um sistema de qualidade sólido que enfatiza a prevenção de defeitos e a redução do desperdício com a cadeia de fornecimento. Na seção 7.3 da norma ISO/TS 16949 “Projeto e desenvolvimento” o foco é a prevenção de erros antes mesmo da detecção dos mesmos e deixa claro a importância da FMEA neste processo. A seção 7.5 que contempla a produção e provisão de serviços, é focada nos requisitos para planejar e dar continuidade da produção e serviços sob condições controladas também cita a FMEA em seu plano de controle (MCDERMOTT; MIKULAK; BEAUREGARD, 2008).

Outras normas referentes a análise de modo e efeitos de falha:

- SAE J 1739:2021 *Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Including Design FMEA, Supplemental FMEA-MSR, and Process FMEA.*
- SO 12132:2017 *Plain Bearings – Quality Assurance of Thin-Walled Half Bearings – Design FMEA;*
- IEC 60812 Ed. 3.0 b:2018 *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA)*
- BS EM IEC 60812:2018 *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA) (British Standard)*
- DS/EM IEC 60812:2018 *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA)*
- SAE ARP 5580:2001 (SAE ARP5580-2001) *Recommended Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Practices for Non-Automobile Applications*
- SAE RB 9:2016 (SAE RB9-2016) *Failure Mode and Effect Analyses*

### 3.5 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A análise da distribuição de Weibull é uma ferramenta muito versátil, se destaca na parte prática por sua capacidade de ajustar os dados de várias áreas de conhecimento, como por exemplo, dados de vida, dados meteorológicos, dados relacionados à economia e dados para a ciência e engenharia (RINNE, 2009).

Segundo Abernethy (2010), a primeira vantagem da análise de Weibull é a habilidade de providenciar análises de falha razoavelmente precisas com amostras muito pequenas, sem

ser necessário uma grande quantidade de eventos de falha para que o estudo seja satisfatório, isso implica em uma redução de custos e tempo. Outra vantagem é a simplicidade e a utilidade dos gráficos gerados na análise, sendo de enorme importância para a equipe de engenharia e gerência. A quantidade de informações de grande relevância para a análise retiradas do gráfico é um grande diferencial desta distribuição. O eixo das abscissas contempla a medida de vida ou envelhecimento. A escala vertical representa a porcentagem acumulada de falhas.

Os dois principais parâmetros que definem a linha de Weibull são: parâmetro de forma, representada por  $\beta$ ; parâmetro de escala, representado pela letra grega  $\eta$ , que contempla o tempo até a falha na análise (ABERNETHY, 2010).

O parâmetro de forma ( $\beta$ ) indica a classe de falha em que a distribuição se encontra, são elas: mortalidade infantil ( $\beta < 1$ ), falhas aleatórias ( $\beta=1$ ) e falhas por desgaste ( $\beta > 1$ ). O parâmetro de escala ( $\eta$ ) é o valor de tempo em que 63,2% das unidades analisadas falharão.

Abernethy (2010) explana em sua obra, que a plotagem de Weibull é muito útil no planejamento de manutenções. O parâmetro de forma ( $\beta$ ) traz as informações da necessidade de reparos ou inspeções não programadas, como por exemplo, para um valor de beta menor que 1, em que a mortalidade infantil de componentes ocorre, os reparos não são uma boa escolha, devido seu alto custo. Para valores de beta iguais a 1, falhas totalmente aleatórias ocorrem, pois, a Weibull se iguala a uma exponencial, onde o item sempre está tão bom como um novo em teoria, desta forma é completamente inviável a realização de reparos ou inspeções não programadas. Para valores acima de 1, o período de inspeções programadas ou reparos pode ser lido diretamente do gráfico plotado e com base na probabilidade de falha considerada aceitável para determinada situação podem ser programadas as atividades.



## 4 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento das ações realizadas neste estudo está descrito neste capítulo, apresentando os dados dos equipamentos inseridos no estudo, as ferramentas utilizadas e como foram aplicadas.

### 4.1 CALDEIRA SELECIONADA

A caldeira, no qual o sistema de tiragem faz parte, é uma caldeira mista, com câmara de combustão aquatubular e corpo flamatubular, da marca SECAMAQ Ind. de Máquinas LTDA, com ano de fabricação em 1999. Sua categoria é B, que opera em regime de pressão entre 5,88 e 19,6 bar. A pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) é de 10 kgf/cm<sup>2</sup> com uma capacidade de produção de 2000 kgvapor/h, os dados citados estão dispostos na placa de identificação da caldeira (Figura 18).

Figura 18 - Placa de Identificação e informações sobre a caldeira



Fonte: O Autor (2022).

A caldeira é de fundamental importância para a indústria, e para a indústria madeireira sua principal função é a geração do vapor para a secagem de madeira. Este modo de secagem de madeira em estufas é uma forma de acelerar o processo de retirada de umidade da madeira, de forma prática, rápida e controlada. O processo se inicia no corte da tora verde, as ripas

cortadas são empilhadas na forma de grade (processo este denominado de gradeação) e assim que finalizada a montagem delas, elas são colocadas na estufa para a secagem.

A secagem ocorre em vários estágios, com uma uniformização do estado das grades para então proceder a secagem de forma homogênea, controlada e suave. O vapor produzido pela caldeira se faz presente neste processo e é utilizado para o aquecimento da madeira. O vapor flui no interior de trocadores de calor que irradiam o calor para o ambiente controlado da estufa. A estufa utiliza ventiladores para circular este ar aquecido por entre as grades de madeira, para que de modo uniforme seja realizada a secagem. Segundo Weik *et al* (1984, apud KEINE, 1997, p.110), o vapor pode ser também injetado diretamente no interior da estufa (vaporização), auxiliando na redução de níveis de tensão de crescimento da madeira, entre outros benefícios.

#### 4.2 DESENVOLVIMENTO DO PLANO DE MANUTENÇÃO DO SISTEMA DE TIRAGEM

A idealização da implementação do plano de manutenção preventiva em um setor da empresa, fez-se após reuniões com a direção da empresa, a qual em contato com a equipe prestadora de serviços de manutenção descreveu problemas em seu sistema, onde equipamentos falhavam de forma inesperada, gerando custos altos. Além do custo da manutenção corretiva a penalização se dava também através do processo de produção oneroso em seu parque fabril, gerando grandes quantidades de refugos e uma alta taxa diária de retrabalho.

O problema é identificado no momento da secagem de madeira, no fim do ciclo de secagem uma quantidade alta de madeira ainda se encontrava com uma umidade acima do permitido para a liberação da estufa. Esta umidade excedente acarreta em problemas posteriores no processo de fabricação das peças finais, como por exemplo a interferência no momento da colagem das ripas de madeira para formação de um painel, a umidade não permite que a cola cumpra com seu dever e defeitos são encontrados como painéis abertos.

Relatou-se também que constantes manutenções corretivas eram realizadas no sistema de tiragem da unidade geradora de vapor. Sendo assim sugeriu-se realizar uma *FMEA* para a identificação dos possíveis modos de falha e a criticidade de cada um.

Conforme Cotnareanu (2003, apud POSSO, 2007) a *FMEA* utilizada para a identificação dos possíveis modos de falha necessita algumas adaptações em seu formulário. Os conceitos de severidade, ocorrência e detecção são vistos de modo mais focado para a vida

útil do equipamento. A severidade é fundamentada no tempo de parada do equipamento causado pelo sinistro. A frequência com que ocorrem as quebras gera o parâmetro da ocorrência, já a detecção é resultado da avaliação de como é possível prever a falha.

Para a execução da *FMEA* montou-se uma equipe composta por membros de diversas áreas, de acordo com o manual disponibilizado pelo grupo AIAG (2008, p. 9, tradução nossa) “o desenvolvimento do *FMEA* é de responsabilidade de um grupo multidisciplinar cujos membros possuem o conhecimento necessário do assunto”. A equipe foi formada pelo diretor da empresa contratante, o engenheiro responsável pela equipe de manutenção terceirizada, um membro da empresa de manutenção e líder da equipe *FMEA*, o supervisor do setor de estufas e o operador de caldeira. Desta forma foi possível obter variados níveis de conhecimento sobre o problema.

Com a criação da equipe realizada, prosseguiu-se com o início da análise em si, conforme apresentado por McDermott; Mikulak; Beauregard (2008) (Quadro 1). Planejou-se então reuniões com aproximadamente uma hora de duração. Tempo suficiente para debates produtivos sem prejudicar as atividades dos envolvidos.

Quadro 1 - Passos para a realização de um FMEA

1	Revisão do processo ou produto.
2	<i>Brainstorm</i> para potenciais modos de falha.
3	Lista de potenciais efeitos para cada modo de falha.
4	Definir uma classificação de severidade para cada efeito.
5	Definir uma classificação de ocorrência para cada modo de falha.
6	Definir uma classificação de detecção para cada modo de falha e/ou efeito.
7	Calcular o RPN para cada efeito.
8	Priorizar os modos de falha para ação.
9	Tomar ações para eliminar ou reduzir os modos de falha de alto risco.
10	Calcular o RPN resultante a medida que os modos de falha são reduzidos ou eliminados.

Fonte: McDermott; Mikulak; Beauregard (2008, p. 23, tradução nossa).

O passo 1 foi necessário para conceituar do processo de secagem os membros e da importância da caldeira para o funcionamento correto do processo. Nos passos de número 2 e 3 a demanda de tempo e esforço da equipe é maior devido à importância de definir quais são os modos de falhas e seus efeitos. A partir deles é conduzida a análise, ou seja, é primordial disponibilizar maior tempo para estas duas etapas.

Definiu-se os modos de falha nos setores da caldeira e da secagem, bem como os efeitos de cada modo (Apêndice A - Quadro *FMEA*). A severidade para cada item foi avaliada visando o tempo de parada e o impacto no processo gerado pela falha, a ocorrência foi

determinada pela frequência com que ocorrem as falhas e a dificuldade de detecção de acordo com a probabilidade da falha ser percebida antes de acontecer.

É possível observar falhas frequentes, porém com uma severidade muito baixa, como por exemplo os fios de sensores de umidade rompidos. Por ser feito de fios de cobre finos, qualquer exigência maior do cabo faz com que os fios se rompam, impedindo a transmissão de dados. Este modo de falha é de fácil reparo e não impacta significativamente no processo pois pode ser rapidamente substituído pelo próprio operador das estufas, sendo assim não entra na lista de prioridades.

Com todos os fatores devidamente preenchidos, o cálculo do número de prioridade de risco foi gerado e assim então foi possível elencar os modos de falha mais críticos para a situação. Destacou-se então o modo de falha ocorrido no rotor do sistema de tiragem da caldeira, que apresentava uma alta taxa de ocorrência, uma severidade alta por impactar de forma significativa todo o processo e a detecção só era possível após a falha do componente através do ruído de grande proporção causado (Quadro 2).

Os controles atuais, que geralmente fazem parte da estrutura da *FMEA*, foram suprimidos do Quadro 2 por apresentarem apenas controles básicos ou nenhum, como o desarme do painel de controle no modo de falha de resistência excessiva para o motor elétrico, por exemplo. O quadro completo pode ser visualizado no apêndice.

Quadro 2 - Valores mais críticos de NPR estabelecidos

Componente / Equipamento	Função	Causa(s)	Modo(s) de falha	Efeito(s) potencial(is) de falha	Sever. (S)	Ocor. (O)	Detec. (D)	N.P.R.
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Desalinhamento do eixo do rotor	Colisão das pás do rotor com a parede de metal da chaminé de tiragem	Pás e parede danificados, prejudicando o fluxo dos gases	10	7	10	<b>700</b>
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Queima da graxa de lubrificação	Quebra dos rolamentos	Paralisação do rotor da tiragem da caldeira	9	7	8	<b>504</b>
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Rolamentos travados ou mal montados (bucha com folga)	Quebra dos mancais	Paralisação do rotor da tiragem da caldeira	9	5	6	<b>270</b>
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Desalinhamento do eixo do rotor	Resistência excessiva para o motor elétrico (desarme)	Queima de motor/desgaste excessivo das correias	9	6	5	<b>270</b>
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Bucha apresentando folga, gerando esforços indesejados	Desgaste prematuro dos rolamentos	Paralisação do rotor da tiragem da caldeira	8	6	5	<b>240</b>
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Temperatura excessiva dos rolamentos	Queima da graxa de lubrificação	Ruído excessivo	7	8	4	<b>224</b>
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Montagem imprópria	Desalinhamento de polias do motor e eixo do rotor	Esforços indesejados nas correias, desgaste excessivo	7	8	4	<b>224</b>
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Desalinhamento do eixo do rotor	Vibração demasiada do conjunto	Aceleração de desgaste e aparecimento de folgas	7	5	6	<b>210</b>
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Sujeira em excesso nos componentes	Partículas indesejadas no filme de graxa dos rolamentos	Ruído e aquecimento excessivo da graxa	7	7	4	<b>196</b>

Fonte: Autor (2022).

Partindo do valor de NPR presente na planilha da *FMEA*, que indica uma urgência maior do que os modos restantes, demandando uma ação recomendada mais elaborada que seria a criação de um plano de manutenção preventiva para os componentes atuantes no sistema de tiragem da caldeira.

As ações recomendadas pela equipe de manutenção foram as seguintes:

- aberturas mais frequentes da escotilha de manutenção do rotor para verificar o alinhamento do mesmo no enclausuramento (Figura 19);
- manter em estoque peças de reposição (rolamentos, mancais e correias);
- alinhamento do eixo;
- lubrificação regular nos itens rolantes e troca periódica conforme cronograma.

Figura 19 – Escotilha do rotor do sistema de tiragem



Fonte: Autor (2022)

Para iniciar com o processo de implantação do plano de manutenção preventiva, buscou-se dados sobre as falhas ocorridas no sistema de tiragem da caldeira com o intuito de criar indicadores chave de desempenho que possibilitariam mensurar e comparar resultados posteriormente no estudo. O primeiro indicador é decorrente da divisão das horas de trabalho em funcionamento normal pelo número de paradas para manutenção corretiva, denominado de tempo médio até a falha (*Mean Time To Failure - MTTF*), que pode ser obtido pela Equação (1) (LAMEIRINHAS, 2021, p. 1).

$$MTTF = \frac{\sum \text{horas de trabalho em funcionamento normal}}{N^{\circ} \text{ de paradas}} \quad (1)$$

Dados de tempo de reparo foram obtidos também através de documentos como ordens de serviço de manutenção, estes dados geram outro indicador conhecido como tempo médio para reparo (*Mean Time To Repair - MTTR*), indicado na Equação 2 (LAMEIRINHAS, 2021, p. 1).

$$MTTR = \frac{\sum \text{tempos de reparo}}{N^{\circ} \text{ de intervenções realizadas}} \quad (2)$$

Somando os dois indicadores das equações 1 e 2, o tempo médio entre falhas (*Mean Time Between Failure - MTBF*) é obtido.

$$MTBF = MTF + MTTR \quad (3)$$

Os indicadores *MTBF* e *MTTR* podem ser utilizados para o cálculo da disponibilidade do equipamento, ou seja, a porcentagem na qual esteve disponível em um determinado período de tempo específico. A Equação 4 apresenta como a disponibilidade é calculada (LAMEIRINHAS, 2021, p. 1).

$$Disponibilidade = \left( 1 - \left( \frac{MTTR}{MTBF} \right) \right) \times 100\% \quad (4)$$

Nos seis meses que compreendem os dados analisados (Quadro 3), e os tempos de parada para realização de manutenções corretivas do Quadro 4, foi possível calcular os indicadores *MTTF*, *MTTR*, *MTBF* e disponibilidade.

Quadro 3 - Período dos dados obtidos de modo geral

	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho
Dias	28	31	30	31	30	31
Horas Totais	672	744	720	744	720	744
Paradas	2	3	3	4	5	5
Horas em funcionamento	631	674	648	621	592	587

Fonte: O autor (2022).

Ao analisar o Quadro 3, é possível observar um aumento nas ocorrências de paradas devido a falhas ocorridas nos componentes do sistema de tiragem da caldeira, resultando assim na interrupção do funcionamento. Este aumento de ocorrências pode estar associado às mudanças climáticas na região, onde gradientes de temperatura altos ocorrem, podendo gerar o desgaste prematuro dos componentes. Outro fator que pode ter influenciado o aumento das paradas e quebras é a manutenção corretiva ineficaz, como por exemplo, rolamentos colocados no eixo erroneamente, falta de lubrificação dos elementos rolantes do sistema, desalinhamento no momento da montagem do conjunto eixo, rolamento e mancais, entre outros fatores.

Quadro 4 - Tempo das paradas em horas

	1	2	3	4	5	TOTAL
Fevereiro	14	27				41
Março	20	35	15			70
Abril	27	30	15			72
Maiο	18	25	20	60		123
Junho	21	19	23	25	40	128
Julho	16	25	19	78	19	157

Fonte: O autor (2022).

Os cálculos de *MTTF*, *MTTR*, *MTBF* e disponibilidade resultaram na média do período de seis meses avaliados para o sistema como um todo, 191,20 horas para o tempo médio para a falha (*MTTF*), 25,93 horas para o tempo médio para reparo (Quadro 5). O *MTBF* médio foi de 217,13 horas, e a disponibilidade média da caldeira de 86,51%. Segundo Lameirinhas (2021), uma boa disponibilidade, coerente a padrões mundiais, está acima de 90%, indicando assim que o equipamento do estudo está abaixo do padrão global de disponibilidade.

Quadro 5 - Indicadores mensais (*MTTF*, *MTTR*, *MTBF* e Disponibilidade)

MTTF por Mês [h]		MTTR por Mês [h]		MTBF por Mês [h]		Disponibilidade	
Fevereiro	315,50	Fevereiro	20,50	Fevereiro	336,00	Fevereiro	93,90%
Março	224,67	Março	23,33	Março	248,00	Março	90,59%
Abril	216,00	Abril	24,00	Abril	240,00	Abril	90,00%
Maiο	155,25	Maiο	30,75	Maiο	186,00	Maiο	83,47%
Junho	118,40	Junho	25,60	Junho	144,00	Junho	82,22%
Julho	117,40	Julho	31,40	Julho	148,80	Julho	78,90%
Média	191,20	Média	25,93	Média	217,13	Média	86,51%

Fonte: Autor (2022).

Esta indisponibilidade do equipamento gera uma série de custos para a empresa, pois seu processo depende do funcionamento correto da caldeira. Pensou-se então em quantificar o custo médio das paradas. Utilizando então os indicadores de desempenho calculados, em um mês com 31 dias (744 horas) e considerando o *MTBF* de 217,13 horas, a caldeira em média apresentará 3,43 ciclos em um mês, aproximadamente quatro paradas por conta de falhas.

Considerando o custo de uma manutenção corretiva por hora igual a R\$ 92,00 por membro da equipe de manutenção atuante na atividade, em média são necessários 5 membros para a realização. A média de tempo para reparo resultante do Quadro 5 é de 25,93 horas. Subtraindo as horas de espera de resfriamento da caldeira do tempo total de manutenção o tempo médio efetivo de reparo se torna 13,93 horas. Com quatro intervenções realizadas, 55,72 horas de manutenção são cobrados. Assim multiplicamos o tempo total em manutenção pelo



valor de hora de cada indivíduo e pela quantidade de membros. Resultando assim, apenas com a manutenção corretiva um gasto para empresa de R\$ 25.631,20 em média por mês.

É possível também somar neste montante o lucro cessante, bem como o custo das horas extras que a secagem leva para ser concluída, visto que em média uma secagem normal dura de 75 a 85 horas, e com os problemas apresentados a secagem chega a até 105 horas por ciclo de secagem, ou seja, até 40% a mais de tempo dentro da estufa, impactando em atraso de produção e envio do produto, maiores consumos de energia e insatisfação do cliente. Não foi gerada a análise em torno deste montante, apenas em cima das manutenções para não fugir ao escopo do trabalho.

Com a implantação deste plano de manutenção preventiva busca-se reduzir a quantidade de manutenções corretivas e inesperadas geradoras deste custo alto para a empresa.

Segundo Gulati (2009), de acordo com a regra de 10% da manutenção preventiva, quando um ativo está com a manutenção preventiva programada para uma frequência de, por exemplo, 20 dias, a execução da preventiva deve ser realizada em até 2 dias antes da data limite. Com isso as organizações mantêm a confiabilidade do processo. Este método foi utilizado no plano de manutenção deste trabalho, como forma de manter o programa criado em dia e confiável.

#### **4.2.1 Análise de tempos até a falha através da distribuição de Weibull**

Para o planejamento das ações de manutenção preventiva nos componentes, optou-se pela análise de distribuição de Weibull, uma análise muito eficaz mesmo com amostras pequenas, capaz de prever consideravelmente bem as falhas e retornar análises de falha razoavelmente precisas (ABERNETHY, 2010).

Abernethy (2010), em sua obra, identifica para o leitor, quais os melhores métodos (*best practices*) para se usar em determinadas situações. Como o próprio autor menciona na página 10-1 do livro, problemas de engenharia geralmente são resolvidos pelos métodos de máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation*) e pela regressão linear (*Rank Regression*).

Primeiramente, identificou-se na *FMEA* os componentes relacionados aos maiores valores de RPN, sendo eles os rolamentos, mancais e correias. A partir destes componentes foram realizadas as análises das distribuições de Weibull.

Unidades que não falharam, ou unidades com um diferente modo de falha são exemplos de dados censurados. Dados censurados, se presentes na base de dados, são mantidos

na análise. Estes dados não são plotados, porém a ordem de classificação deles não deve ser ignorada, gerando assim uma classificação ajustada (*Adjusted ranks*).

Após o ajuste de classificação é realizada então a classificação mediana dos dados ajustados, através da aproximação de Bernard. Esta aproximação é suficientemente precisa para a plotagem dos gráficos da análise de Weibull como para a estimação de parâmetros. A Equação 5 apresenta o cálculo da aproximação realizada, onde  $i$  é o valor da classificação ajustada e  $N$  é a soma de todas falhas e suspensões (ABERNETHY, 2010, p. 2-7).

$$\text{Rank mediano de Bernard} = \frac{(i - 0,3)}{(N + 0,4)} \quad (5)$$

O ajuste de ranks, representado pela letra “ $i$ ” é obtido conforme a Equação 6:

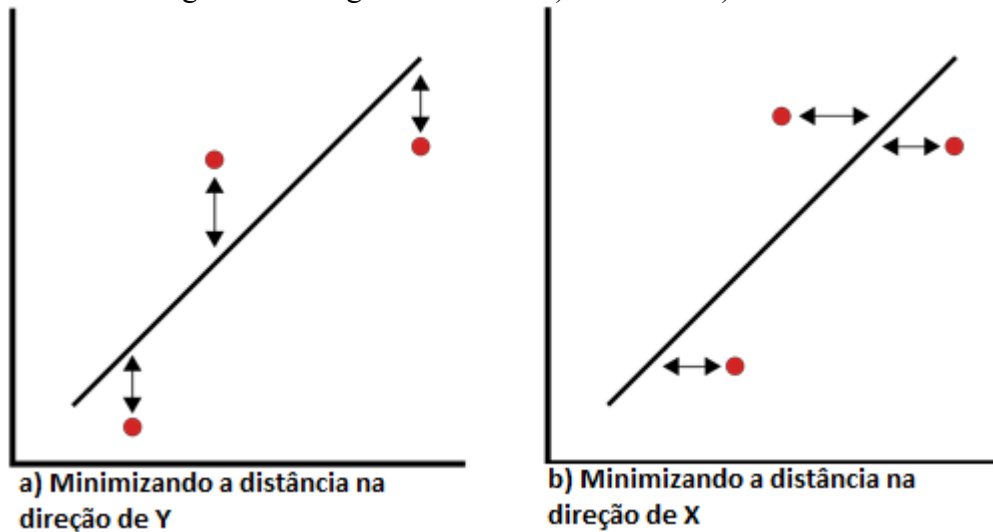
$$i = \text{Rank ajustado} = \frac{(\text{Rank Reverso}) \times (\text{Rank ajustado anterior}) + (N + 1)}{(\text{Rank Reverso}) + 1} \quad (6)$$

Com os valores da função de distribuição cumulativa (*CDF – Cumulative distribution function*) que indicam os valores de probabilidade de falha, calculados, prossegue-se à linearização dos dados para plotagem gráfica. Para o eixo das abcissas utiliza-se a expressão  $\ln(t-\gamma)$ , onde  $t$  são os tempos até a falha e o gama “ $\gamma$ ” representa uma mudança na origem, por exemplo um rolamento não terá falha por desgaste sem que haja uma indução de danos suficientes para a falha, causada pela rotação, desta maneira a mudança de origem pode auxiliar na melhoria de adequação da reta que contempla os pontos obtidos no gráfico.

Já o eixo das ordenadas é linearizado de acordo com a expressão  $\ln(\ln(1/(1-F(t))))$ , sendo  $F(t)$  a *CDF*.

A regressão de classificação mediana foi utilizada para a determinação da reta de melhor adequação pelo ajuste da curva de regressão dos mínimos quadrados. Este método é muito comum e considerado uma boa prática nas resoluções de problemas de engenharia. Há dois métodos para a regressão, o ajuste através dos mínimos quadrados de  $X$  em  $Y$ , e  $Y$  em  $X$  (Figura 20). Por históricos apresentados em sua obra, Abernethy (2010, p. 5-7), confirma que a reta  $X$  em  $Y$  é mais precisa do que a reta  $Y$  em  $X$ . Isso se explica pois, na análise de Weibull, o eixo das abcissas, que representa os tempos para a falha (*TTF*), apresentam sempre maior dispersão estatística comparado ao eixo das ordenadas que contempla a função de distribuição acumulada (*CDF*). Recomenda-se então a regressão representada pela Figura 20(a).

Figura 20 – Regressão linear: a) X em Y e b) Y em X



Fonte: Reliawiki (2006, p. 1, tradução nossa)

Para a análise das falhas ocorridas, a plotagem dos gráficos foi realizada por meio do *software* Minitab. Realizando os cálculos apresentados anteriormente, foram obtidos os gráficos de distribuição de Weibull linearizados, bem como os parâmetros de relevância para o estudo, o parâmetro de forma ( $\beta$ ) e o parâmetro de escala ou vida característica ( $\eta$ ).

As análises foram realizadas para os rolamentos, mancais e correias, individualmente. Os dados foram tratados e então plotados os gráficos. O Quadro 6 apresenta os dados utilizados para a plotagem dos gráficos indicativos aos rolamentos. No Apêndice D – Dados para análise de Weibull se encontram os quadros com dados referentes aos mancais e correias.

Quadro 6 - Dados referentes aos rolamentos

i	TTF (horas)	Rank mediano de Bernard
1	270	9,46%
2	361	22,97%
3	408	36,49%
4	410	50,00%
5	471	63,51%
6	484	77,03%
7	550	90,54%

Fonte: Autor (2022)

A partir dos dados presentes no Quadro 6, determinou-se os valores dos eixos das abcissas e das ordenadas para a plotagem do gráfico.

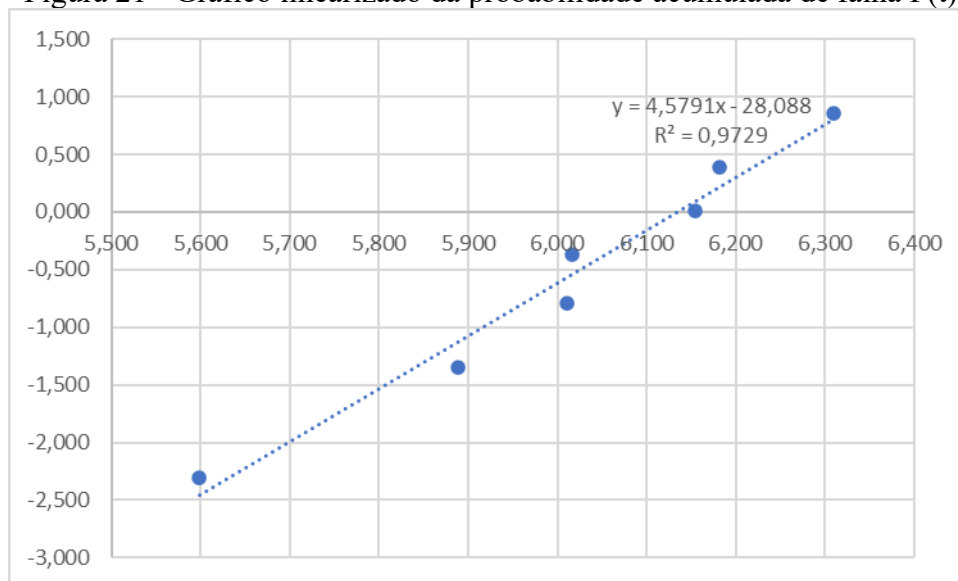
Os valores linearizados dos eixos para a análise dos rolamentos estão apresentados no Quadro 7, resultando a plotagem do gráfico na Figura 21.

Quadro 7 - Valores dos eixos das abcissas e ordenadas para rolamentos

X	Y
5,598	-2,309
5,889	-1,343
6,011	-0,790
6,016	-0,367
6,155	0,008
6,182	0,386
6,310	0,858

Fonte: Autor (2022)

Figura 21 - Gráfico linearizado da probabilidade acumulada de falha F(t)

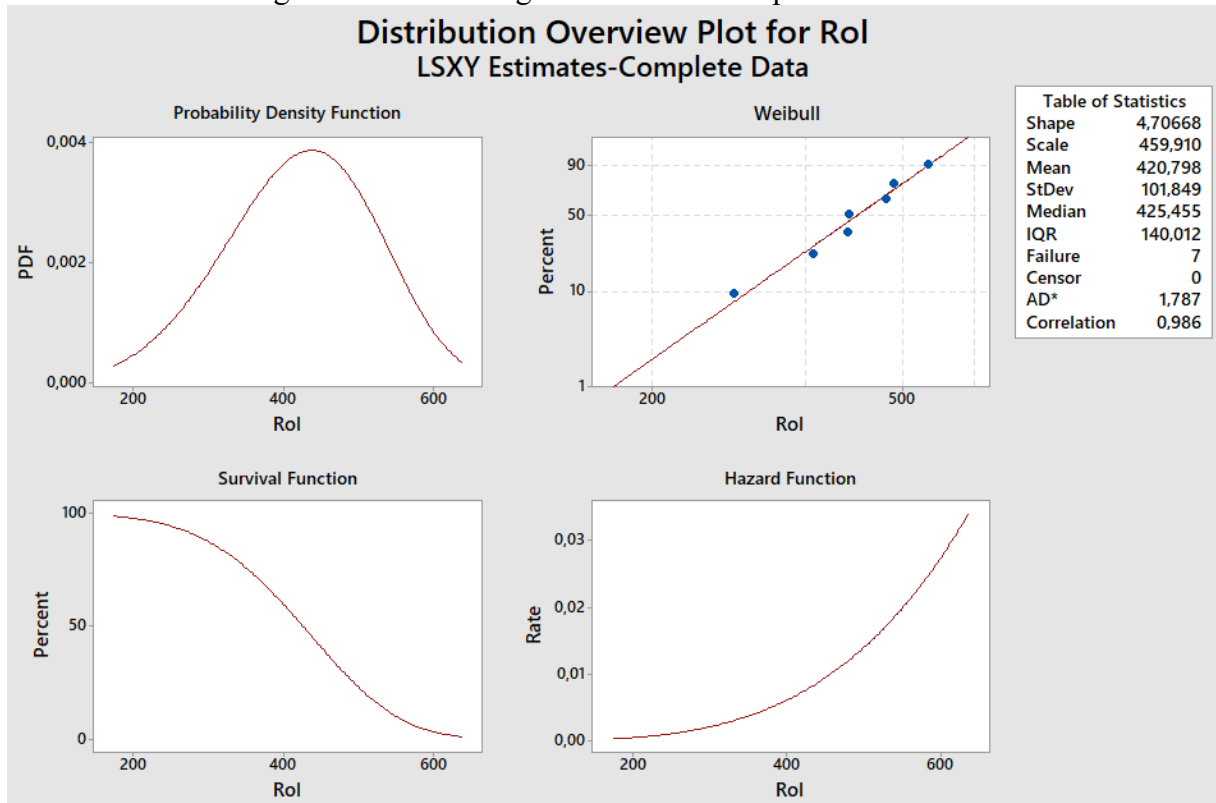


Fonte: Autor (2022)

Este gráfico demonstra os pontos, retirados da planilha Excel, em que ocorreram as falhas dos rolamentos, a partir dele é possível retirar as informações necessárias para os parâmetros de forma e escala da distribuição de Weibull. Ao traçar a linha de tendência e obter a equação de primeiro grau ( $y = 4,5791x - 28,088$ ) já é possível retirar dela o valor do parâmetro de forma representado pela inclinação da reta, ou seja, o valor que acompanha a variável “x” na função.

Para obtenção de resultados mais concretos, utilizou-se o software Minitab para auxílio na geração dos gráficos e obtenção dos parâmetros (Figura 22). Pela proximidade dos dados obtidos tanto no Excel quanto no Minitab, optou-se pela utilização do Minitab, por ser uma ferramenta estatística mais aprofundada e de maior clareza de dados.

Figura 22 - Gráficos gerados no Minitab para rolamentos



Fonte: Autor (2022)

O parâmetro de escala é proveniente do fator de interseção da equação da reta. Pela linearização da função de confiabilidade, o valor da constante  $\alpha$  é equivalente a  $-\beta \ln(\eta)$ . Pela equação, o valor de alfa é  $-28,8568$ , resultando em um valor do parâmetro de escala da função igual a  $459,910$ . Outra informação relevante obtida no gráfico Weibull da Figura 22 é o coeficiente de correlação ( $R^2$ ), ele indica o percentual da variação dos pontos considerado pelo modelo matemático (neste caso uma reta), onde nesta análise  $98,6\%$  dos pontos são representados pela reta, um valor excelente para o estudo em questão.

De acordo com os valores de  $\beta$  e  $\eta$  encontrados, é possível concluir que: os rolamentos apresentam um desgaste rápido, por seu valor de beta estar acima de quatro (ABERNETHY, 2010). E referente ao valor de eta ( $\eta$ ), conclui-se que  $63,2\%$  dos rolamentos falharão com  $459,91$  horas de operação, aproximadamente.

A mesma análise foi realizada para os mancais e correias. Os gráficos e quadros estão disponíveis no Apêndice D – Dados para análise de Weibull e gráficos resultantes.

Quadro 8 - Resultados dos parâmetros de forma e escala iniciais.

MANCAL	$\beta$	3,07
	$\eta$ [h]	1312,1
CORREIA	$\beta$	3,41
	$\eta$ [h]	799,84
ROLAMENTO	$\beta$	4,7
	$\eta$ [h]	459,91

Fonte: Autor (2022)

O parâmetro de forma obtido para as correias de 3,41 indica que sua Weibull está muito próxima do formato de uma distribuição normal (Quadro 8).

Com os valores obtidos nas análises de Weibull, conclui-se que as correias e mancais estão sofrendo desgaste prematuro, com um  $\beta$  entre 1 e 4. Uma possibilidade de causa deste fenômeno é a alta temperatura irradiada do sistema de tiragem, por conta do fluxo de gases de exaustão. Outro ponto a ser considerado é a grande quantidade de sujeira constantemente depositada sobre os equipamentos, graxa sobressalente em mancais aderem a poeira em sua superfície contaminando o lubrificante e inserindo partículas de sujeira no filme de graxa dos rolamentos.

Por fim a manutenção imprópria realizada agravou o desgaste dos equipamentos. Foram detectados problemas como, tensão extrapolada das correias, gerando muita resistência ao motor e uma força indesejada na polia do eixo do rotor. Polias do eixo do rotor e do motor fora de alinhamento gerando desgaste nas correias.

Com base nos resultados de cada tipo de componente, um cronograma de ações preventivas foi planejado. Apresentou-se os dados retirados para os rolamentos, mancais e correias à direção da empresa para então ser decidido qual o nível de risco de falha a empresa estava disposta a ter.

Para isso foi considerado no primeiro mês de atuação um plano preventivo referente à B10 (ou L10), que significa que os elementos seriam substituídos sempre que atingissem o tempo de utilização equivalente a 10% de probabilidade de falha, obtido na análise de Weibull. Como o sistema em geral estava apresentando uma disponibilidade abaixo do desejado pela direção e resultando em paradas em média a cada 217 horas, foi estabelecido para o mês de agosto trocas preventivas para os rolamentos a cada 250 horas aproximadamente, para os mancais 630 horas e para as correias 415 horas.

O cronograma de ações planejadas e realizadas está disponível no Apêndice B.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao final do cronograma de manutenção preventiva planejado, disponível no Apêndice B, passou-se a obtenção dos resultados segundo a FMEA aplicada, a análise de Weibull estabelecida, os indicadores chave de desempenho, as novas manutenções resultantes do processo e o novo custo das manutenções realizadas.

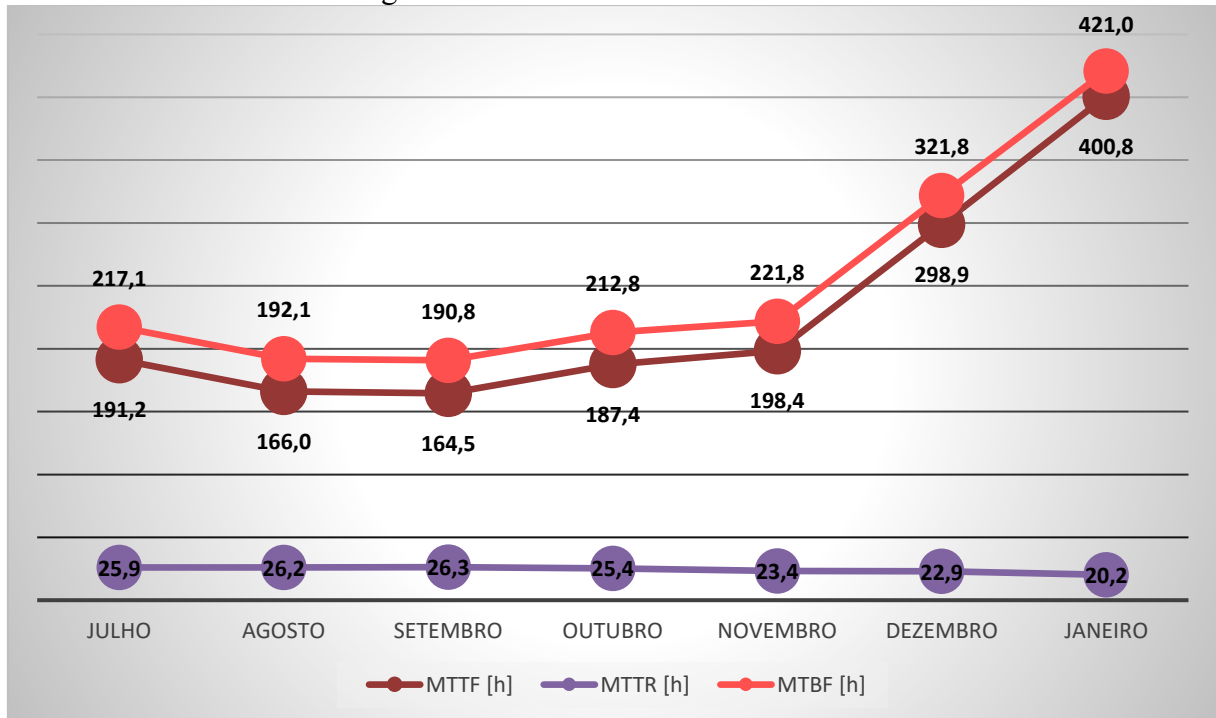
### 5.1 INDICADORES CHAVE DE DESEMPENHO (*KPI*)

Os indicadores chave de desempenho do estudo foram acompanhados mensalmente, onde a métrica utilizada foi manter seis meses corridos para os novos cálculos, ou seja, com o novo mês integrado nos novos cálculos e quadros, o mês mais antigo deixa de ser utilizado para os cálculos futuros. Desta forma é possível manter o mesmo período de análise sem que as falhas do passado continuem afetando os novos resultados.

Para esta análise foram criadas, mensalmente, quadros de formato idêntico aos visualizados no Quadro e no Quadro , para cálculos dos novos indicadores de MTBF, MTTF, MTTR e disponibilidade adquiridos. Todos os quadros estão disponíveis para visualização no Apêndice C – Quadros de Indicadores chave de desempenho mensais.

Ao final do presente estudo, o resultado alcançado para os indicadores com as manutenções preventivas foi segundo a Figura 23, que demonstra o gráfico com as curvas geradas para cada indicador.

Figura 23 - Gráfico Resultante dos KPIs



Fonte: Autor (2022).

Iniciando pelos indicadores mais evidentes, o *MTTF* e *MTBF*. Estes indicadores sofreram uma queda nos três primeiros meses, pois as manutenções haviam apenas iniciado e até este período as falhas dos meses anteriores eram muito relevantes no cálculo desses indicadores.

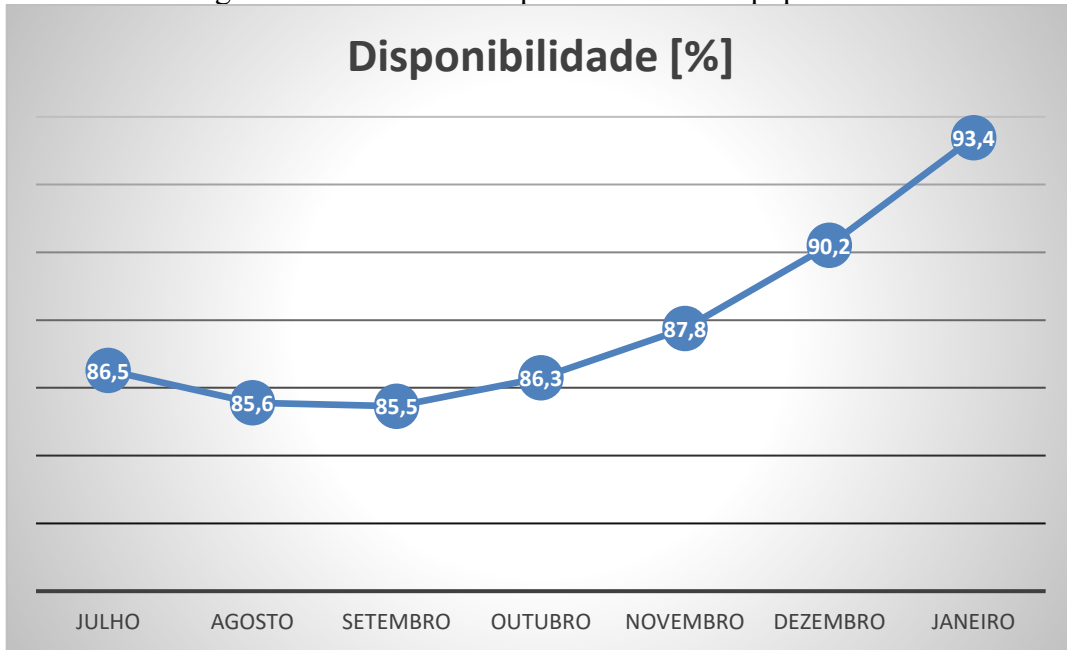
Tendo passado o terceiro mês de ações preventivas, já foi possível verificar as tendências de ascensão dos indicadores, onde os componentes já operavam sob melhores condições e as atividades de inspeção e lubrificação das partes do sistema de tiragem eram regularmente realizadas. Ao final do sexto mês de preventivas o valor do *MTTF* estava próximo de 300 horas de trabalho ininterruptos, quase duas vezes o menor valor obtido no segundo mês (166,3), onde as falhas antigas ainda afetavam o indicador.

O tempo médio para reparo não teve um resultado muito expressivo numericamente, porém ao analisar os quadros gerados mensalmente nota-se que o mês anterior ao início das preventivas (julho) carrega uma quantidade alta de paradas e com longas durações prejudicando assim este indicador durante os 5 primeiros meses subsequentes. No último mês avaliado, o *MTTR* caiu de 24,1 para 20,8 horas, aproximadamente 3 horas de diferença, demonstrando uma tendência de baixa neste valor.



A disponibilidade do equipamento derivada dos indicadores anteriores, teve o comportamento da sua curva semelhante a curva do *MTTF* e *MTBF* como era esperado pela sua equação.

Figura 24 - Gráfico da disponibilidade do equipamento



Fonte: Autor (2022).

Este indicador teve um aumento significativo se observado na Figura 24, que mostra primeiramente um equipamento com um tempo útil de trabalho abaixo do considerado ideal para os padrões globais. No quinto mês dos procedimentos de manutenção preventiva, já foi possível afirmar que o sistema de tiragem e consequentemente a caldeira estavam operando com uma disponibilidade acima do considerado satisfatório, isso ocorreu pela melhoria na condição do equipamento como um todo através das manutenções preventivas, onde nos últimos dois meses foram registrados apenas uma parada por mês, destinadas para a verificação dos rolamentos do rotor que apresentaram ruído que com a lubrificação já deixaram de existir.

Estas melhoras obtidas provenientes das ações preventivas, podem sofrer influência também da sazonalidade. Para isso seria necessária uma análise de verificação se o efeito desta sazonalidade poderia ser descartado na melhoria dos indicadores, através de um teste t de Student. Sendo esta uma sugestão de trabalho futuro indicado na seção da conclusão do trabalho.

Quadro 9 - Indicadores para os meses de fevereiro (antes das ações) e janeiro (depois das ações)

MTTF por Mês [h]		MTTR por Mês [h]		MTBF por Mês [h]		Disponibilidade	
Fevereiro	315,50	Fevereiro	20,50	Fevereiro	336,00	Fevereiro	93,90%
Janeiro	729,00	Janeiro	15,00	Janeiro	744,00	Janeiro	97,98%

Fonte: Autor (2022).

Comparando os meses de fevereiro antes das preventivas e o mês de janeiro posterior às ações, foi possível observar uma melhora nos indicadores, conforme os resultados do Quadro 9. A redução do tempo de reparo proveniente dos meios proativos implantados, diminuindo o tempo gasto para as manutenções. Menores quantidades de falhas ocorridas, pela melhoria nas condições de operação dos componentes e o aumento na vida útil dos mesmos, trouxe um aumento muito bom para a funcionalidade do sistema.

## 5.2 CÁLCULO DO NOVO NPR

Após os seis meses da manutenção preventiva, reuniu-se a equipe responsável pela ferramenta FMEA no estudo e realizou-se o cálculo do novo número de prioridade de risco para os principais modos de falha. Foram analisados os novos parâmetros de severidade, ocorrência e dificuldade de detecção depois dos resultados das manutenções preventivas conforme apresenta o Quadro :

Quadro 10 - Novos valores de NPR

Componente / Equipamento	Função	Causa(s)	Modo(s) de falha	Efeito(s) potencial(is) de falha	Sever. (S)	Ocor. (O)	Detec. (D)	N.P.R.	Resultados da ação				
									Ações tomadas	Sev.	Ocor.	Det.	N.P.R. Resultante
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Desalinhamento do eixo do rotor	Colisão das pás do rotor com a parede de metal da chaminé de tiragem	Pás e parede danificados, prejudicando o fluxo dos gases	10	7	10	700	Abertura da escotilha para inspeção e manutenção de acordo com o cronograma	10	4	8	320
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Queima da graxa de lubrificação	Quebra dos rolamentos	Paralisação do rotor da tiragem da caldeira	9	7	8	504	Troca dos rolamentos no tempo estipulado pelo cronograma de ações preventivas	7	4	6	168
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Rolamentos travados ou mal montados (buchas com folga)	Quebra dos mancais	Paralisação do rotor da tiragem da caldeira	9	5	6	270	Troca dos mancais no tempo estipulado pelo cronograma de ações preventivas	7	4	6	168
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Desalinhamento do eixo do rotor	Resistência excessiva para o motor elétrico (desarme)	Queima de motor/desgaste excessivo das correias	9	6	5	270	Troca das correias no tempo estipulado pelo cronograma de ações preventivas	7	4	5	140
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Bucha apresentando folga, gerando esforços indesejados	Desgaste prematuro dos rolamentos	Paralisação do rotor da tiragem da caldeira	8	6	5	240	Troca dos rolamentos, limpeza e regulagem certa dos componentes no momento da montagem	8	4	5	160
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Temperatura excessiva dos rolamentos	Queima da graxa de lubrificação	Ruído excessivo	7	8	4	224	Lubrificação semanal e troca programada de graxa de acordo com o cronograma.	5	3	8	120
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Montagem imprópria	Desalinhamento de polias do motor e eixo do rotor	Esforços indesejados nas correias, desgaste excessivo	7	8	4	224	Alinhamento de polias	3	3	4	36
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Desalinhamento do eixo do rotor	Vibração demasiada do conjunto	Aceleração de desgaste e aparecimento de folgas	7	5	6	210	Implantação de manutenção preventiva	7	4	5	140
Sistema de Tiragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Sujeira em excesso nos componentes	Partículas indesejadas no filme de graxa dos rolamentos	Ruído e aquecimento excessivo da graxa	7	7	4	196	Limpeza dos mancais para retirada de excesso de graxa no conjunto	3	4	4	48

Fonte: Autor (2022).

De acordo com o cronograma de atividades preventivas, é possível notar que a ocorrência teve uma grande redução apenas com a inclusão de inspeções periódicas dos componentes mais críticos. Aliado às trocas programadas, as ocorrências de falhas dos equipamentos foram reduzidas bem como a severidade dos rolamentos, mancais e correias.

A severidade do modo de falha relacionado ao desalinhamento do rotor e com efeito a colisão das pás do rotor com a parede de metal não teve alteração pois houve um consenso entre os membros da equipe quanto à criticidade desta potencial falha. Um motivo é o longo tempo de reparo, o segundo motivo é a alta taxa de rotação do rotor aliado ao peso elevado do componente como um todo. Com isso foi decidido manter a severidade no nível máximo para que este tópico seja sempre inspecionado até que a direção invista em controles mais sofisticados.

Os modos de falha da temperatura excessiva dos rolamentos foram reduzidos ao realizar a troca, dos componentes antigos. Por apresentarem um grau de ocorrência alto, as inspeções foram definidas de acordo com a análise de Weibull, para assim atenuar a ocorrência destes modos de falha.

A limpeza e lubrificação adequada presentes no cronograma, foram realizadas todas as semanas para prevenir qualquer contaminação dos componentes responsáveis pelo giro livre do eixo do rotor. E assim foi possível observar uma grande diminuição na ocorrência deste modo de falha.

A redução do nível de dificuldade de detecção foi leve, pois apesar de as inspeções acontecerem periodicamente, nenhum controle mais sofisticado foi inserido no sistema para prever estas possíveis falhas. Portanto, a detecção acontecia sempre que o componente estava dando sinais de que estava próximo de falhar, ou já havia falhado.

### 5.3 CUSTOS DE MANUTENÇÃO

Os custos foram avaliados em comparação das manutenções corretivas. Com as novas manutenções preventivas realizadas, contando com número necessário de membros da equipe para a realização das atividades e tempo necessário para a manutenção.

Os valores de manutenção corretiva por parada resultavam em um custo para a empresa em média R\$ 6.854, com um grupo de 5 membros de manutenção com uma parada média de 14,9 horas.

Os valores acordados mensalmente para a implantação da preventiva, com atuação conforme o cronograma, visando o intervalo de horas pré-estabelecido, com a atuação de 3 membros da equipe e cobertura das manutenções corretivas caso ocorressem no período de atuação, foi o equivalente a R\$ 15.715,20 + encargos (17%) totalizando R\$ 18.386,78 cobrados mensalmente com o prazo de seis meses de vigência.

No que se refere aos meses iniciais a empresa se beneficiou com a disponibilidade semanal de uma equipe especializada e cobertura de possíveis falhas no decorrer dos meses, por um custo abaixo da média gasta com manutenções corretivas mensais.

Tomando o mês de agosto como exemplo, foram registradas quatro paradas somando 40 horas de manutenção, resultaria em um custo de R\$ 12.916,80, este valor provém de 3 membros da equipe de manutenção, atuando por 40 horas com um custo de R\$ 92,00 a hora por membro da equipe, somado a esse custo 17% dos encargos. Sendo assim a empresa teve uma economia significativa contando que o valor somente das manutenções corretivas já representa aproximadamente em 70% do valor fixo pago mensalmente.

#### 5.4 ANÁLISE DE WEIBULL

Uma análise de Weibull foi realizada ao final do estudo, referente aos meses de atuação da equipe, visando encontrar os parâmetros resultantes após as ações preventivas e comprovar a eficiência das mesmas.

Conforme o cronograma de atividades realizadas do plano preventivo, nota-se que foram concretizadas as trocas de componentes definidas no plano, no período de agosto até meados de setembro. Isso foi realizado para que nos próximos meses fosse possível verificar a melhora nas condições de trabalho dos componentes e assim aumentar o tempo disponível do sistema em geral. Esta decisão foi tomada em conjunto com a direção para que assim fosse comprovada a eficácia do plano implementado e por se tratar de um período curto para tal análise. Ao final de janeiro obteve-se então os dados para a nova análise de Weibull.

Novamente tomando por base os dados referentes ao rolamento, o Quadro 11 traz as informações utilizadas na análise de Weibull, para fins de comparação com o resultado dos seis meses iniciais.

Quadro 11 - Dados obtidos para os rolamentos

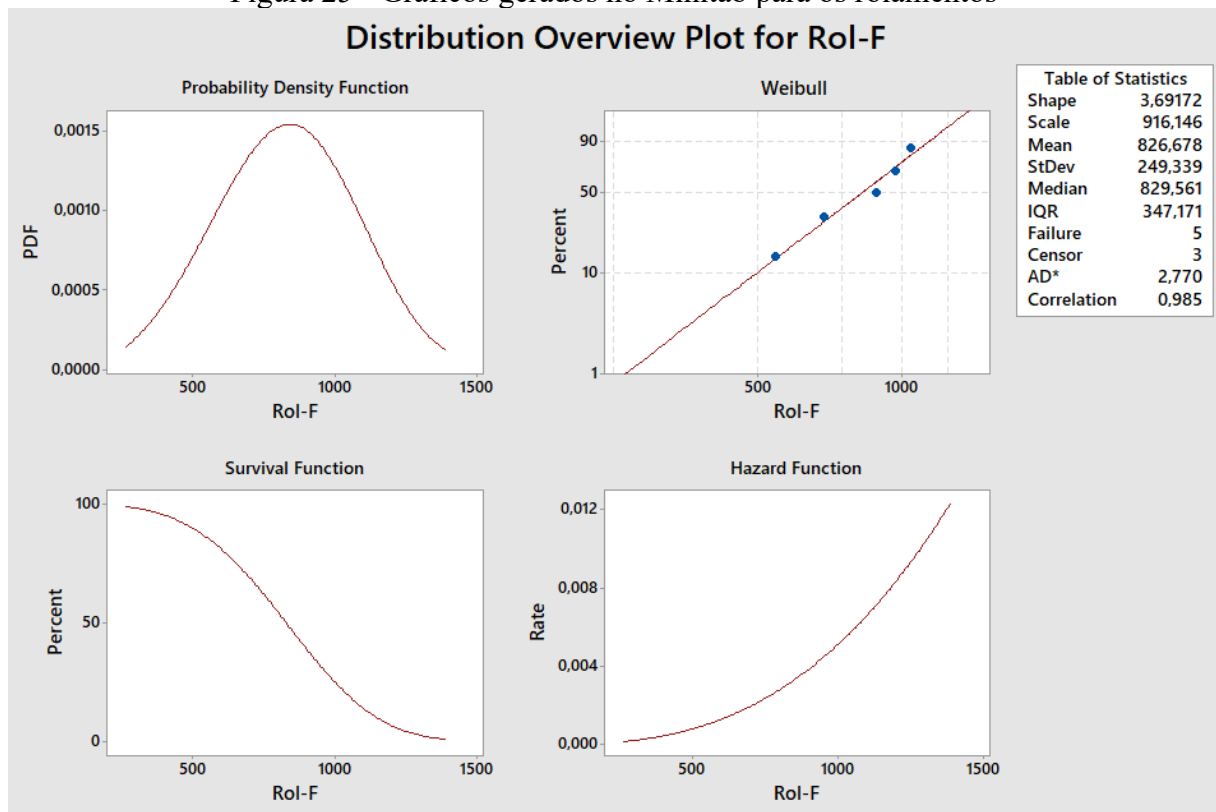
Weibull Rolamentos					
i	TTF (horas)	F/S	Rank Reverso	Rank ajustado (i)	Rank mediano de Bernard
1	219	S	8	Censurado	-
2	227	S	7	Censurado	-
3	245	S	6	Censurado	-
4	545	F	5	1,500	14,29%
5	687	F	4	3,000	32,14%
6	887	F	3	4,500	50,00%
7	973	F	2	5,000	55,95%
8	1045	F	1	6,000	67,86%

Fonte: Autor (2022)

As suspensões, ou dados censurados representados pela letra “S” na terceira coluna do Quadro 11, não são plotados, apenas atuam no ajuste das classificações medianas (coluna 5).

Utilizou-se novamente o software Minitab (versão educacional) para a geração dos gráficos da análise de Weibull, como a própria Weibull, a função densidade de probabilidade (*PDF - Probability Density Function*), a confiabilidade e a taxa de falhas. A Figura 25 traz estes gráficos gerados pelo Minitab.

Figura 25 - Gráficos gerados no Minitab para os rolamentos



Fonte: Autor (2022)

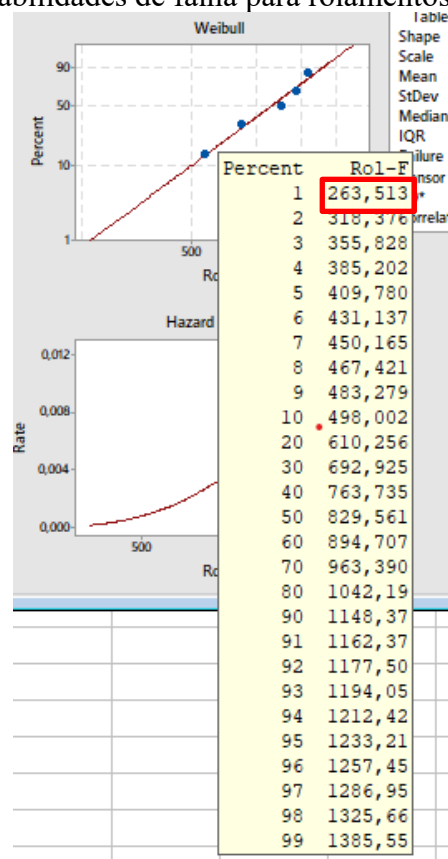
As suspensões, indicadas pela legenda “*Censor*” na Figura 25, são provenientes das trocas programadas no cronograma de ações preventivas, onde ocorreram antes da falha propriamente dita dos componentes.

Analisando os gráficos e os dados obtidos, o parâmetro de forma teve uma alteração de 4,71 para 3,69, indicando uma redução na inclinação da reta. Já o parâmetro de escala teve um aumento significativo, onde anteriormente 63,2% dos rolamentos falhavam com 561 horas, e após a realização das ações preventivas, passou a ser de 916 horas de operação.

A Figura 26 apresenta os valores obtidos para as probabilidades de falha dos rolamentos após o período de atuação da equipe de manutenção.

O valor B10, escolhido inicialmente como limite de tempo para as manutenções preventivas era de 250 horas e após o período de atividades passou a representar menos de 1% (B1) da probabilidade de falha para os rolamentos (Figura 26).

Figura 26 - Probabilidades de falha para rolamentos segundo Weibull



Fonte: Autor (2022)

Um ponto muito interessante de se observar na Figura 25 é o gráfico da taxa instantânea de falha (“*Hazard Function*”). Com a diminuição do parâmetro de forma  $\beta$ , e o

aumento do parâmetro de escala  $\eta$ , a taxa instantânea de falha regrediu, desta forma a probabilidade de falha com desgaste do componente reduziu sua intensidade.

Quadro 12 - Resultados dos parâmetros de Weibull

	INICIAL		FINAL	
	MANCAL	$\beta$	3,07	$\beta$
$\eta$ [h]		1312,1	$\eta$ [h]	1963,74
CORREIA	$\beta$	3,41	$\beta$	4,09
	$\eta$ [h]	799,84	$\eta$ [h]	1768,22
ROLAMENTO	$\beta$	4,7	$\beta$	3,69
	$\eta$ [h]	459,91	$\eta$ [h]	916,15

Fonte: Autor (2022)

Os novos resultados para as correias e mancais são muito satisfatórios no parâmetro de escala. O valor de  $\eta$  passou de 800 para 1768 horas, ou seja, um aumento de cerca de 121% para as correias. Para os mancais o valor passou de 1312 para 1963 horas, aumento este de cerca de 50%.

Porém ao observar o parâmetro de forma, ocorreu um aumento do mesmo em ambos os casos, como pode ser verificado no Apêndice D – Dados para análise de Weibull e gráficos resultantes os dados obtidos para o mancal e as correias foram poucos, resultando em uma base de dados muito pequena. Isso se deve aos valores censurados provenientes das reposições de componentes no tempo estipulado para o primeiro mês de atuação e o aumento na vida dos componentes posteriores, causando assim uma escassez de dados de falha. Essa escassez de dados foi então responsável por um coeficiente de correlação igual a 100%, pois como foram registradas apenas duas falhas tanto para as correias como para os mancais. Os gráficos de Weibull possuem apenas dois pontos na plotagem, definindo totalmente uma reta com 100% de representação dos pontos.

O ideal para esta situação seria uma busca por dados de falhas destes componentes (através de bases externas de dados, conhecimento de especialistas, entre outras formas) e então realizar uma atualização bayesiana com os valores obtidos através do estudo, mas o escopo do trabalho se tornaria muito abrangente, sendo assim uma recomendação para trabalhos futuros.

## 6 CONCLUSÃO

Avaliando os resultados obtidos através dos indicadores chave de desempenho, é possível concluir que a manutenção preventiva tem um grande impacto na melhoria das condições do sistema na qual foi implementada. O aumento de horas de operação sem paradas e a diminuição do número de falhas ao longo dos seis meses avaliados está relacionada às inspeções realizadas com período planejado. Desta forma, prevenindo o surgimento de possíveis novos modos de falha e a reincidência dos já conhecidos. Porém deve-se atentar ao fato da sazonalidade, onde um futuro estudo focado nesta influência pode retornar dados mais precisos da contribuição da manutenção preventiva na melhoria do sistema, bem como a possibilidade de desconsiderar o efeito da sazonalidade.

Os indicadores de desempenho foram desenvolvidos e utilizados para comparação dos resultados, porém apenas com base nos indicadores o estudo se torna muito superficial, onde a realização de uma análise de Weibull, para aprofundar o estudo no quesito das falhas de componentes, se tornou muito útil.

A análise pela distribuição de Weibull trouxe dados muito relevantes para o estudo, desde o momento em que foi estabelecido o cronograma de atividades preventivas de acordo com as probabilidades de falha encontradas nos gráficos gerados, até o momento em que mostrou estatisticamente o aumento na vida útil dos componentes estudados e conseqüentemente sua confiabilidade.

Durante o estudo também foi possível observar que a base de dados tem uma grande influência sobre a análise pois uma base de dados mais pobre, com poucos valores, gera uma série de incertezas no resultado, como foi o caso da análise final dos mancais e correias, onde a obtenção de apenas 2 dados de falhas para cada um dos componentes gerou dados incertos para o parâmetro de forma da distribuição. Como sugestão para trabalhos futuros, deve-se buscar a obtenção de uma base de dados mais robusta (através de bases externas de dados, conhecimento de especialistas, entre outras formas), e então realizar uma atualização bayesiana com os valores obtidos através do estudo. Para que assim sejam eliminadas todas as possíveis incertezas no término da análise.

O alcance do valor de disponibilidade do sistema, ultrapassando o nível considerado de funcionamento ideal, 90%, mostra a eficácia e importância do planejamento dos cuidados com os ativos da empresa, gerando no futuro ganhos de produção e conseqüentemente maior lucro para a instituição.



Em relação a ferramenta *FMEA*, foi constatado que a ferramenta cumpriu sua função ao listar os modos de falha, efeitos e as criticidades de cada um. Esta ferramenta não utiliza meios quantitativos complexos para sua elaboração e mesmo assim gerou resultados efetivos. Como por exemplo, a detecção do modo de falha da colisão do rotor com a parede metálica da chaminé, modo de falha este de alto risco e criticidade detectado com o auxílio da FMEA em uma das reuniões da equipe. A análise foi de grande valia para o presente estudo, porém deve se ter uma equipe preparada e disposta a seguir fielmente os passos e o tempo necessário para a elaboração da ferramenta, onde muito debate e discussão é necessário.

Em relação aos custos da empresa com manutenções, a manutenção preventiva implantada no setor de caldeiras compensou o investimento realizado. Pois diminuiu a quantidade de manutenções corretivas ocorridas, aumentou a capacidade de produção ao manter o equipamento operando por mais tempo sem falhas e reduziu o retrabalho no setor de secagem. Portanto, promovendo um funcionamento correto da caldeira na geração do vapor para o processo de secagem da madeira.

A empresa obteve uma quantia significativa de economia. Isto gera maiores investimentos em inovações e melhorias para o negócio, trazendo cada vez mais benefícios para a empresa e para os colaboradores.

É possível concluir através deste estudo também, a necessidade de seguir com o cronograma estabelecido. Ao respeitar os prazos de manutenção, a geração de problemas foi reduzida de uma forma expressiva, mantendo assim a boa condição dos ativos e melhorando a desempenho do sistema em geral.

A manutenção preventiva retorna ótimos resultados comparado com as manutenções corretivas, porém o tempo pré-estabelecido de troca de componentes faz com que em muitos casos não se utilize o componente até seu tempo ótimo de funcionamento, fazendo com que uma peça seja “descartada” de forma prematura. Com o avanço cada vez mais acentuado da tecnologia e a rapidez com que a indústria 4.0 se faz presente em todos os setores fabris do país, uma sugestão de trabalho futuro seria a implementação de meios tecnológicos com o intuito preditivo nos equipamentos, maximizando o rendimento tanto do equipamento como do sistema como um todo.

## REFERÊNCIAS

- ABERNETHY, R. B. **The new Weibull Handbook**. 5<sup>a</sup>. ed. North Palm Beach: [s.n.], 2010.
- ALMEIDA, M. A. Sua Caldeira é uma Bomba Relógio? **MATEC Soluções Corporativas**, São José dos Campos, 2018.
- AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG). **Potential failure mode and effects analysis (FMEA) Reference Manual**. 4<sup>a</sup>. ed. Southfield: AIAG, 2008.
- BAGGIO, R. O. **Modelagem de uma Caldeira Flamotubular com Fornalha Aquatubular**. Universidade Federal de Santa Catarina. Blumenau, p. 82. 2018.
- BAZZO, E. **Geração de Vapor**. 2<sup>a</sup> Edição. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.
- BERTSCHE, B. **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering**. 1<sup>a</sup>. ed. Berlin: Springer, 2008.
- BRAAKSMA, A. J. J.; KLINGENBERG, W.; VELDMAN, J. Failure mode and effect analysis in asset maintenance: a multiple case study in the process industry. **International Journal of Production Research**, Londres, v. 51, n. 4, p. 1055-1071, Fevereiro 2013. ISSN 1366-588X.
- BRASIL, M. D. T. E. E. **NR 13: Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanque metálicos de armazenamento**. Brasília, p. 43. 2019.
- DHILLON, B. S. **Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers**. 1<sup>a</sup>. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- DIAS, A. et al. **Metodologia para análise de risco: Mitigação de perda de SF6 em disjuntores**. Florianópolis: [s.n.], 2013. 303 p. ISBN ISBN: 978-85-98128-61-0 (ebook).
- GULATI, R. **Maintenance and Reliability Best Practices**. 1<sup>a</sup>. ed. Nova Iorque: Industrial Press, Inc., 2009.
- GYURKOVITS, J. L. **Caldeiras**. [S.l.]. 2004.
- HESELTON, K. **Boiler Operator's Handbook**. 1<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Fairmont Press, 2004.
- KEINE, S. **Avaliação do processo de secagem de madeira em estufa com banho de vapor**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 240. 1997.
- LAMEIRINHAS, G. 8 indicadores indispensáveis para gestão da manutenção. **Site da Tractian**, 2021. Disponível em: <[www.tractian.com/blog/indicadores-de-manutencao](http://www.tractian.com/blog/indicadores-de-manutencao)>. Acesso em: 28 Dezembro 2021.
- LUFT, A. L. **Dimensionamento térmico de uma caldeira mista**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, p. 57. 2017.

MARTINELLI, L. C. **Geradores de Vapor**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi, p. 141. 2003.

MCDERMOTT, R. E.; MIKULAK, R. J.; BEAUREGARD, M. R. **The basics of FMEA**. 2ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

MORO, N. **Introdução à Gestão de Manutenção**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Florianópolis, p. 33. 2007.

PERA, H. **Geradores de vapor: um compêndio sobre a conversão de energia com vistas à preservação da ecologia**. 2ª. ed. São Paulo: Fama, 1990.

POSSO, R. K. **Análise dos fatores de influência na aplicação do "FMEA de processo" em produtos estampados e sugestão de melhoria**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2007.

RELIAWIKI. Parameter Estimation. **Reliawiki**, 2006. Disponível em: <[https://reliawiki.org/index.php/Parameter\\_Estimation#Rank\\_Regression\\_on\\_Y](https://reliawiki.org/index.php/Parameter_Estimation#Rank_Regression_on_Y)>. Acesso em: Janeiro 2022.

RINNE, H. **The Weibull Distribution: A Handbook**. Giessen, Germany: CRC Press, 2009. 782 p.

RODRIGUES, D. M. et al. **Análise de Modo e Efeito de Falha Potencial - FMEA**. Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul. São Leopoldo, p. 13. 2010.

STROBEL. **Caldeiras - TM - 364 - Máquinas Térmicas I**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 51. 2013.

TÉCNICA, GB. GB Técnica. **GB Técnica**, 2021. Disponível em: <<https://www.gbtecnica.com.br/index.php/novidades/caldeiras/>>. Acesso em: 25 Novembro 2021.

TELHADO, D. **Projeto Mecânico de Caldeiras de vapor**. Petrobras. [S.l.], p. 93. 20--.

THAMIL. Caldeiras Flamotubulares. **Thamil**, 2021. Disponível em: <<http://www.thamil.com.br/caldeiras-flamotubulares.html>>. Acesso em: 25 Maio 2021.

TOGAWA, V. Os Principais Tipos de Caldeiras. **Togawa Engenharia**, 2020. Disponível em: <<https://togawaengenharia.com.br/blog/os-principais-tipos-de-caldeiras/>>. Acesso em: 18 Abril 2021.

ZOTTIS, J.; PAGNOSSIN, R. D. S. **Tiragem**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 27. 2008.

## APÊNDICE A - QUADRO FMEA

### Quadro 13 - Quadro FMEA

ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA POTENCIAL (FMEA)															
Responsável: Everaldo Preparado por: Oberdan Equipe: Wagner, Everaldo, Oberdan, Carlos e José Revisão: 01															
Componente / Equipamento	Função	Causa(s)	Modo(s) de falha	Efeito(s) potencial(is) de falha	Sever. (S)	Ocor. (O)	Controles Atuais		N.P.R.	Ações Recomendadas	Responsável	Resultados da ação			N.P.R. Resultante
							Prevenção	Deteção				Detec. (D)	Ocor.	Sev.	
Sistema de Tragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Desalinhamento do eixo do rotor	Colisão das pás do rotor com a parede de metal da chaminé de tragem	Pás e parede danificadas; prejudicando o fluxo dos gases	10	7	Não há	Não há	10	700	Equipe de manutenção	Abertura da escotilha para inspeção e manutenção de acordo com o cronograma	4	8	320
Sistema de Tragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Queima da grava de lubrificação	Quebra dos rolamentos	Paralisação do rotor da tragem da caldeira	9	7	Não há	Não há	8	504	Equipe de manutenção	Troca dos rolamentos no tempo estipulado pelo cronograma de ações preventivas	4	6	168
Sistema de Tragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Rolamentos travados ou mal montados (bucha com folga)	Quebra dos mancais	Paralisação do rotor da tragem da caldeira	9	5	Não há	Não há	6	270	Equipe de manutenção	Troca dos mancais no tempo estipulado pelo cronograma de ações preventivas	4	6	168
Sistema de Tragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Desalinhamento do eixo do rotor	Resistência excessiva para o motor elétrico (desarme)	Queima de motor/desgaste excessivo das correias	9	6	Não há	Desarme no painel de controle (alarme)	5	270	Equipe de manutenção	Troca das correias no tempo estipulado pelo cronograma de ações preventivas	4	5	140
Sistema de Tragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Bucha apresentando folga, gerando esforços indesejados	Desgaste prematuro dos rolamentos	Paralisação do rotor da tragem da caldeira	8	6	Não há	Não há	5	240	Equipe de manutenção	Troca dos rolamentos, limpeza e regulagem certa dos componentes no momento da montagem	4	5	160
Sistema de Tragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Temperatura excessiva dos rolamentos	Queima da grava de lubrificação	Ruído excessivo	7	8	Acrescimo de graxa	Não há	4	224	Equipe de manutenção	Lubrificação semanal e troca programada de graxa de acordo com o cronograma.	3	8	120
Sistema de Tragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Montagem imprópria	Desalinhamento de polias do motor e eixo do rotor	Esforços indesejados nas correias, desgaste excessivo	7	8	Montagem correta	Não há	4	224	Equipe de manutenção	Alinhamento de polias	3	4	36
Sistema de Tragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Desalinhamento do eixo do rotor	Vibração demasiada do conjunto	Aceleração de desgaste e apertamento de folgas	7	5	Não há	Não há	6	210	Equipe de manutenção	Implantação de manutenção preventiva	4	5	140
Sistema de Tragem	Realizar a circulação dos gases na caldeira	Sujeira em excesso nos componentes	Partículas indesejadas no filme de graxa dos rolamentos	Ruído e aquecimento excessivo da graxa	7	7	Lubrificação correta	Visual	4	196	Equipe de manutenção	Limpeza dos mancais para retirada de excesso de graxa no conjunto	4	4	48

Fonte: Autor (2022).

## APÊNDICE B – CRONOGRAMA DE ATIVIDADES PREVENTIVAS

Quadro 14 - Cronograma de atividades preventivas

(continua)

<b>Atividades</b>	05/ago	13/ago	15/ago	24/ago	02/set	10/set	13/set	02/out
Inspeção do rotor	X				X			
Inspeção estrutural	X		X		X		X	
Troca de Mancais		X						
Troca de Rolamentos	X		X	X	X		X	X
Troca da graxa		X	X	X	X			X
Lubrificação dos rolamentos e mancais	LUBRIFICAÇÃO REALIZADA DE 1 A 2 VEZES POR SEMANA CONFORME A NECESSIDADE							
Troca de Correias			X		X			

"X" - Trocas Preventivas

"O" - Trocas por falha (Para dados da Weibull)

16/out	20/out	27/out	03/nov	10/nov	17/nov	24/nov	01/dez
X		X				X	
X		X		X		X	
			O				
						O	
	X		X		X		X

LUBRIFICAÇÃO REALIZADA DE 1 A 2 VEZES POR SEMANA CONFORME A NECESSIDADE

					O		
--	--	--	--	--	---	--	--

Quadro 13 - Cronograma de atividades preventivas

(conclusão)

08/dez	15/dez	22/dez	29/dez	05/jan	12/jan	19/jan	26/jan
		X				X	X
X		X		X		X	X
			O				
	X		X		X		X
LUBRIFICAÇÃO REALIZADA DE 1 A 2 VEZES POR SEMANA CONFORME A NECESSIDADE							
							O

Fonte: Autor (2022).

**APÊNDICE C – QUADROS DE INDICADORES CHAVE DE DESEMPENHO  
MENSAIS**

- Tempo das paradas (em horas):

Quadro 15 - Tempo de paradas mensais

	1	2	3	4	5	TOTAL
Fevereiro	14	27				41
Março	20	35	15			70
Abril	27	30	15			72
Maiο	18	25	20	60		123
Junho	21	19	23	25	40	128
Julho	16	25	19	78	19	157
Agosto	15	17	35	21		88
Setembro	30	22	20			72
Outubro	19	18				37
Novembro	16	16	24			56
Dezembro	23					23
Janeiro	15					15
<b>Soma:</b>						<b>882</b>

Fonte: Autor (2022)

- Dados mensais de funcionamento da caldeira:

Quadro 16 - Dados mensais de funcionamento da caldeira

(continuação)

	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho
Dias	28	31	30	31	30
Horas Totais	672	744	720	744	720
Paradas	2	3	3	4	5
Horas em funcionamento	631	674	648	621	592

(conclusão)

Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro
31	31	30	31	30	31	31
744	744	720	744	720	744	744
5	4	3	2	3	1	1
587	656	648	707	664	721	729

Fonte: Autor (2022)

- Indicadores chave de desempenho mensais:

Quadro 17 - Indicadores MTBF, MTTF, MTTR e Disponibilidade de todo período

MTTF por Mês [h]		MTTR por Mês [h]		MTBF por Mês [h]		Disponibilidade	
Fevereiro	315,50	Fevereiro	20,50	Fevereiro	336,00	Fevereiro	93,90%
Março	224,67	Março	23,33	Março	248,00	Março	90,59%
Abril	216,00	Abril	24,00	Abril	240,00	Abril	90,00%
Maio	155,25	Maio	30,75	Maio	186,00	Maio	83,47%
Junho	118,40	Junho	25,60	Junho	144,00	Junho	82,22%
Julho	117,40	Julho	31,40	Julho	148,80	Julho	78,90%
Agosto	164,00	Agosto	22,00	Agosto	186,00	Agosto	88,17%
Setembro	216,00	Setembro	24,00	Setembro	240,00	Setembro	90,00%
Outubro	353,50	Outubro	18,50	Outubro	372,00	Outubro	95,03%
Novembro	221,33	Novembro	18,67	Novembro	240,00	Novembro	92,22%
Dezembro	721,00	Dezembro	23,00	Dezembro	744,00	Dezembro	96,91%
Janeiro	729,00	Janeiro	15,00	Janeiro	744,00	Janeiro	97,98%

Fonte: Autor (2022)



## APÊNDICE D – DADOS PARA ANÁLISE DE WEIBULL E GRÁFICOS RESULTANTES

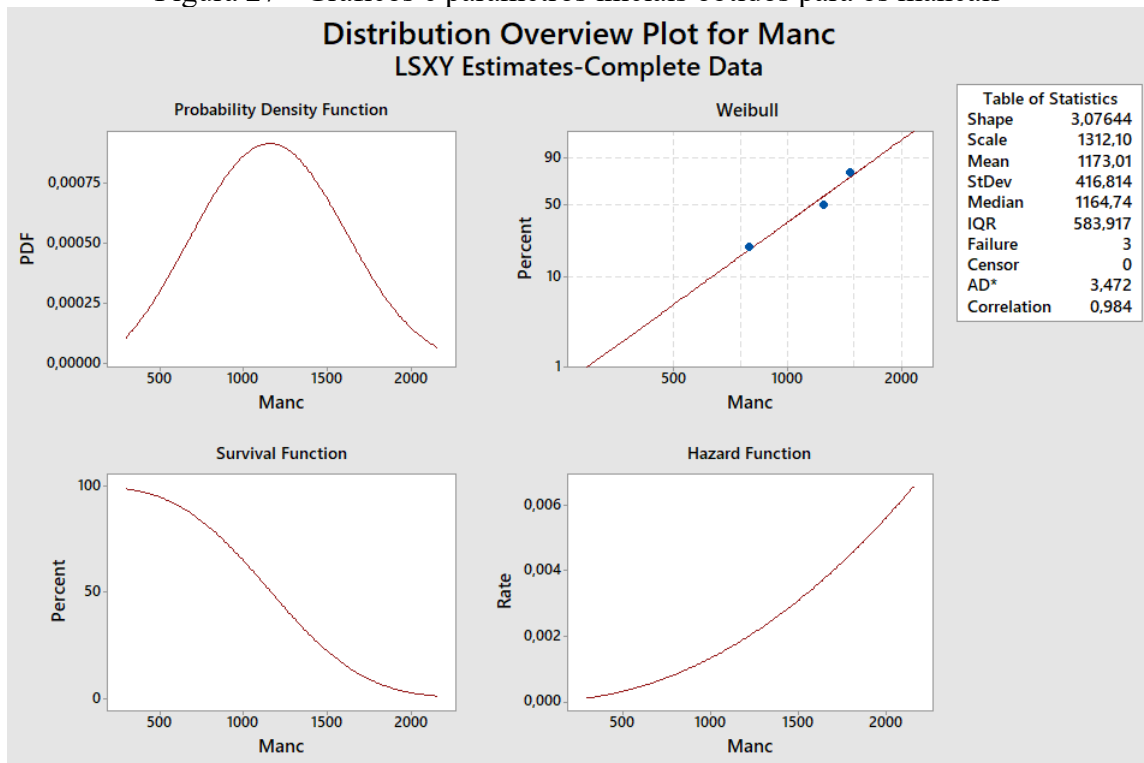
- Mancais:

Quadro 18 - Dados iniciais dos Mancais

Weibull Mancais		
i	TTF (horas)	Rank mediano de Bernard
1	792	20,59%
2	1243	50,00%
3	1467	79,41%

Fonte: Autor (2022)

Figura 27 - Gráficos e parâmetros iniciais obtidos para os mancais



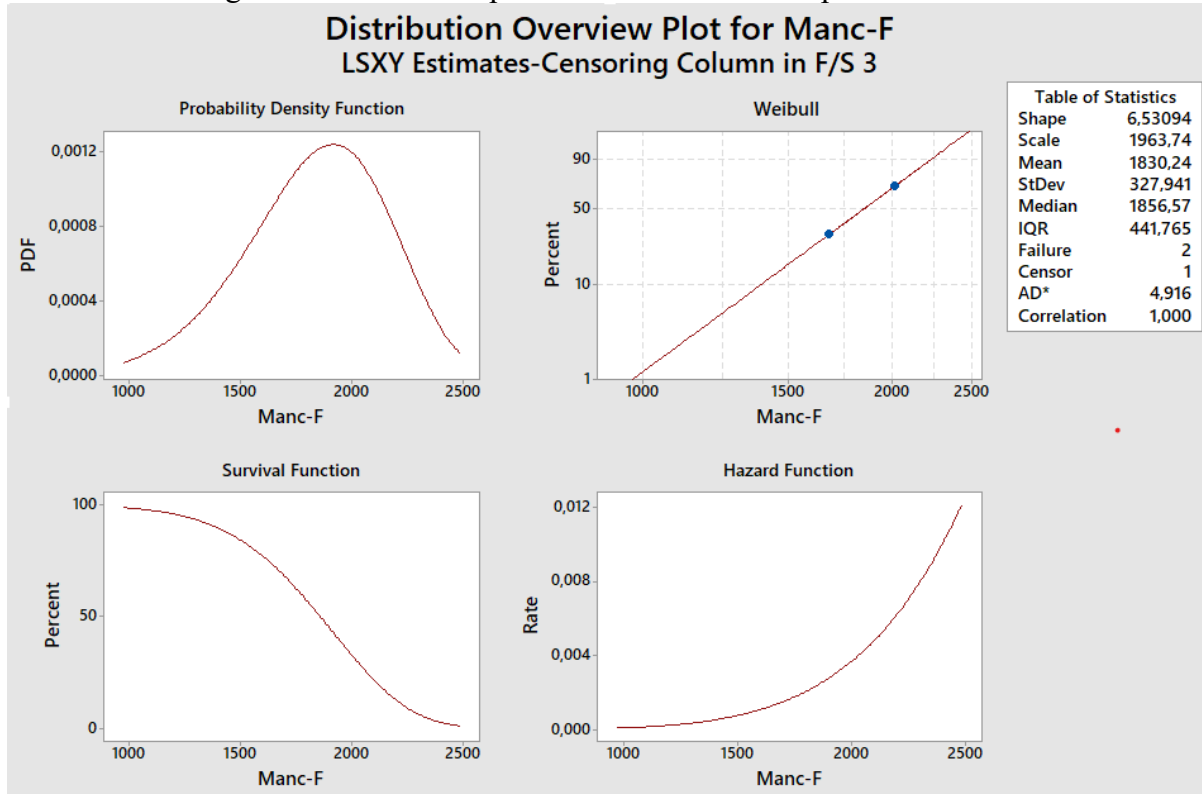
Fonte: Autor (2022)

Quadro 19 - Dados finais dos Mancais

Weibull Mancais					
i	TTF (horas)	F/S	Rank Reverso	Rank ajustado (i)	Rank mediano de Bernard
1	624	S	3	Censurado	
2	1681	F	2	1,333	30,39%
3	2017	F	1	2,667	69,61%

Fonte: Autor (2022)

Figura 28 - Gráficos e parâmetros finais obtidos para os mancais



Fonte: Autor (2022)

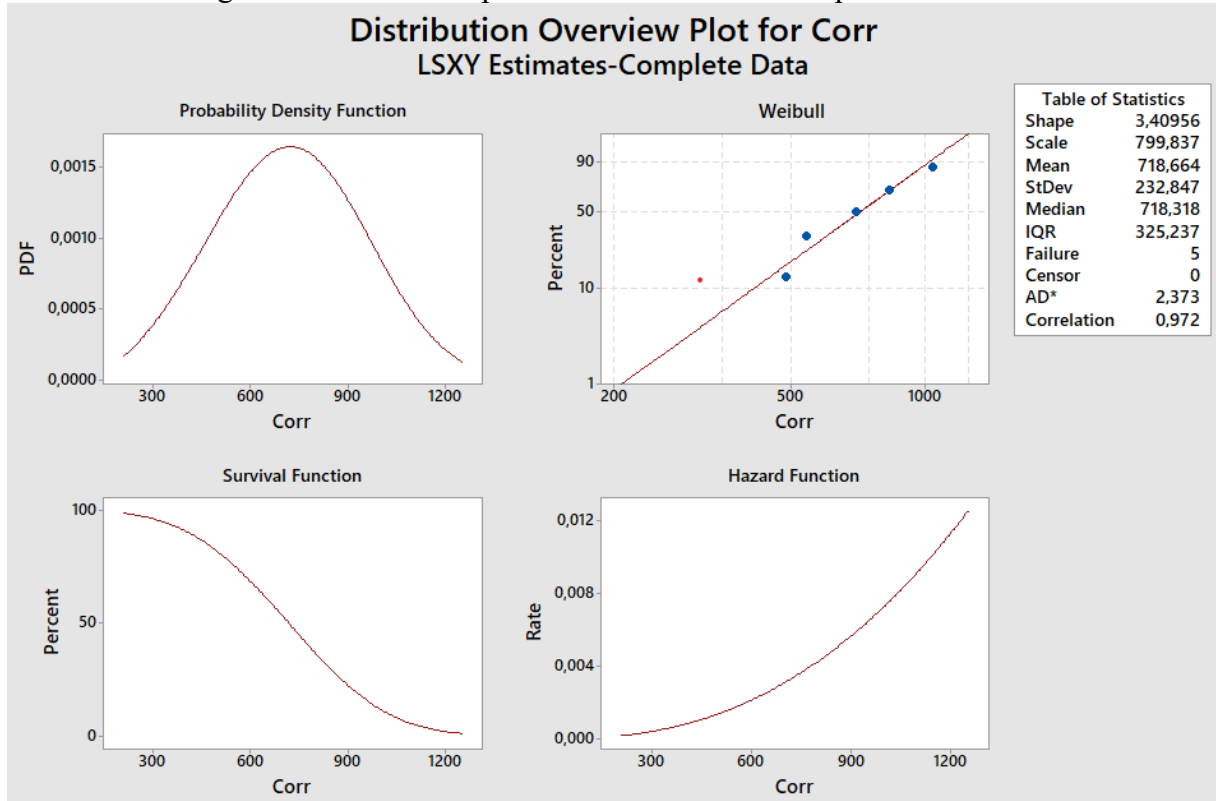
- Correias:

Quadro 20 - Dados iniciais das correias

Weibull Correias		
i	TTF (horas)	Rank mediano de Bernard
1	485	12,96%
2	540	31,48%
3	699	50,00%
4	833	68,52%
5	1045	87,04%

Fonte: Autor (2022)

Figura 29 - Gráficos e parâmetros iniciais obtidos para as correias



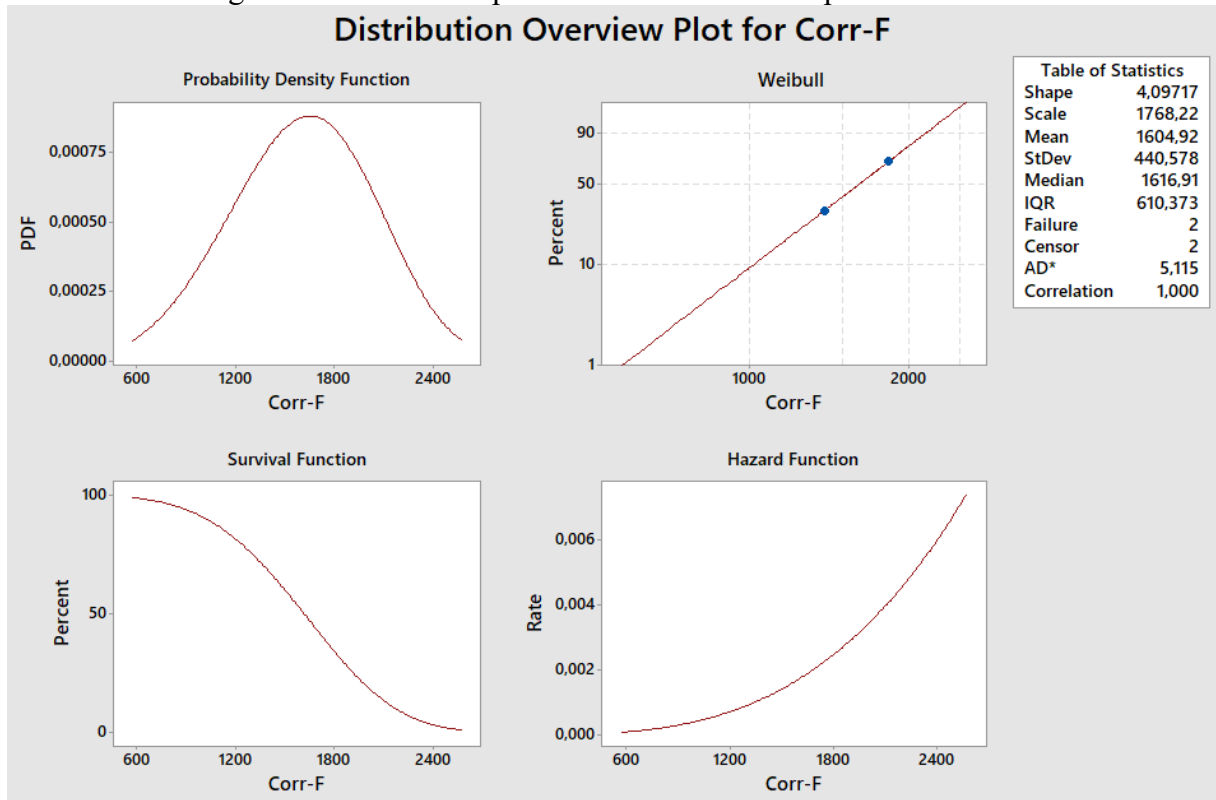
Fonte: Autor (2022)

Quadro 21 - Dados finais das correias

<b>Weibull Correias</b>					
<b>i</b>	<b>TTF (horas)</b>	<b>F/S</b>	<b>Rank Reverso</b>	<b>Rank ajustado (i)</b>	<b>Rank mediano de Bernard</b>
1	387	S	4	Censurado	
2	446	S	3	Censurado	
3	1389	F	2	1,667	31,06%
4	1837	F	1	3,333	68,94%

Fonte: Autor (2022)

Figura 30 - Gráficos e parâmetros finais obtidos para as correias



Fonte: Autor (2022)