

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E  
SISTEMAS  
NÍVEL MESTRADO**

**BRUNO PINHO**

**ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO BASEADA NA CONFIABILIDADE SISTÊMICA  
EM LINHAS DE PRODUÇÃO: ESTUDO NA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA**

**São Leopoldo**

**2019**

BRUNO PINHO

**ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO BASEADA NA CONFIABILIDADE SISTÊMICA  
EM LINHAS DE PRODUÇÃO: ESTUDO NA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Miguel Afonso Sellitto

São Leopoldo

2019

P654e	<p>Pinho, Bruno. Estratégia de manutenção baseada na confiabilidade sistêmica em linhas de produção : estudo na indústria metal-mecânica / por Bruno Pinho. – 2019. 156 f. : il. ; 30 cm.</p> <p>Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, São Leopoldo, RS, 2019. “Orientador: Dr. Miguel Afonso Sellitto”.</p> <p>1. Estratégia de manutenção. 2. Confiabilidade. 3. Manutenibilidade. 4. Failure mode and effect analysis (FMEA). I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 658.58</p>
-------	---

BRUNO PINHO

**ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO BASEADA NA CONFIABILIDADE SISTÊMICA  
EM LINHAS DE PRODUÇÃO: ESTUDO NA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 15 de janeiro de 2019

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. André Luis Korzenowski – UNISINOS

---

Prof. Dr. Cristiano Richter – UNISINOS

---

Prof. Dr. Elpidio Oscar Benitez Nara – UNISC

Dedico esse trabalho  
a minha família e, especialmente,  
a minha noiva, Andressa.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, professor Miguel Afonso Sellitto, pela dedicação, apoio e orientação durante a pesquisa;

Aos professores André Luís Korzenowski e Cristiano Richter pelas contribuições durante a qualificação dessa dissertação;

Aos colegas, professores e colaboradores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da UNISINOS;

Aos profissionais da empresa estudo de caso, pelo apoio e disponibilização de dados para a realização desta pesquisa;

Aos meus pais e irmã pelo apoio e por propiciarem a realização dessa magnífica experiência, o mestrado;

A Andressa Lucrecio, minha noiva, por todo amor, carinho e compreensão, durante esse período.

## RESUMO

O objetivo desta dissertação é desenvolver um método para definir a estratégia de manutenção de uma empresa metal-mecânica do ramo de forjados. Para uma linha de forjamento e o setor de corte de matéria prima foram definidas as estratégias de manutenção para treze máquinas. Na linha de forjamento foram identificadas as máquinas críticas, por indicação da empresa e análise de gargalo, aplicando o FMEA para identificação dos modos de falha das mesmas. A metodologia de pesquisa é modelagem quantitativa e uma pesquisa exploratória para a abordagem qualitativa. A técnica de pesquisa quantitativa é a modelagem probabilística do tempo entre falhas e do tempo para o reparo para as máquinas e do tempo médio entre falhas para o sistema. As máquinas do setor de corte estão dispostas em paralelo, as da linha de forjamento em série. Seis máquinas estão no período de mortalidade infantil, o que requer a estratégia de manutenção corretiva. Sete máquinas estão no período de maturidade, o que requer a estratégia de manutenção preditiva. O sistema produtivo foi avaliado conforme o diâmetro do aço a ser processado. O sistema produtivo que apresentou o melhor valor de tempo médio entre falhas foi para produção de itens cujo aço é de Ø64mm a Ø120mm, 14,39h. Já a maior disponibilidade geral do sistema é para a produção de itens cujo aço é de Ø35mm a Ø63mm, 90,63%. A definição das máquinas para aplicação do FMEA na linha de forjamento se deu através da análise do gargalo da linha e por indicação da empresa, uma máquina que não possui *backup*, o martelo hidráulico e o forno a indução. No martelo hidráulico os modos de falha de maior risco, foram encontrados, nas válvulas hidráulicas de acionamento, referente à válvula pneumática piloto, e no sistema de acionamento elétrico, referente à falha no pedal elétrico. No forno a indução se destacou o modo de falha na estação de aquecimento. A análise dos modos de falha e seus efeitos possibilitaram propostas de melhorias nos processos de manutenção das duas máquinas identificadas como críticas na linha de forjamento. A realização do FMEA possibilitou uma complementação das estratégias de manutenção adequadas para as máquinas analisadas, propondo práticas pontuais de manutenção preventiva.

**Palavras-chave:** Estratégia de manutenção. Confiabilidade. Manutenibilidade. FMEA.

## ABSTRACT

The objective of this dissertation is to develop a method to define the strategy of maintenance of a metal-mechanic company of the forging sector. The maintenance strategies for thirteen machines were defined for a forging line and the raw material cutting sector. In the forging line, critical machines were identified by company identification and bottleneck analysis, applying the FMEA to identify failure modes. The research methodology is quantitative modeling and an exploratory research for the qualitative approach. The technique of quantitative research is the probabilistic modeling of the time between failures and the time for the repair for the machines and the mean time between failures for the system. The machines in the sector of cut are arranged in parallel, those of the forging line in series. Six machines are in the infant mortality period, which requires a corrective maintenance strategy. Seven machines are in the maturity period, which requires the predictive maintenance strategy. The production system was evaluated according to the diameter of the steel to be processed. The productive system that presented the best average time between failures was to produce items whose steel is  $\text{Ø}64\text{mm}$  to  $\text{Ø}120\text{mm}$ , 14.39h. Already the greater general availability of the system is for the production of items whose steel is of  $\text{Ø}35\text{mm}$  to  $\text{Ø}63\text{mm}$ , 90,63%. The definition of the machines for the application of the FMEA in the forging line occurred through the analysis of the line bottleneck and the company's indication, a machine that does not have backup, the hydraulic hammer and the induction furnace. In the hydraulic hammer, the most dangerous fault modes were found in the hydraulic control valves for the pilot pneumatic valve and in the electric drive system for the failure of the electric pedal. In the induction furnace the failure mode in the heating station was highlighted. The analysis of failure modes and their effects made possible improvements in the maintenance processes of the two machines identified as critical in the forging line. The realization of FMEA made it possible to complement the adequate maintenance strategies for the analyzed machines, proposing specific practices of preventive maintenance.

**Key-words:** Maintenance strategy. Reliability. Maintenanceability. FMEA.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento esperado para as estratégias de manutenção .....	17
Figura 2 - Tendência da utilização das principais ferramentas para promover a qualidade.....	22
Figura 3 - Tendência da aplicação dos recursos de manutenção .....	24
Figura 4 - Curva da banheira ( <i>bath-tube curve</i> ) .....	38
Figura 5 - Etapas para execução do MCC .....	41
Figura 6 - Capacidade de corte das máquinas do setor de corte.....	48
Figura 7 - Diagrama de blocos da linha.....	55
Figura 8 - Papel de probabilidade de Weibull da amostra do FI-FO-008 .....	57
Figura 9 - Taxa de falhas FI-FO-008 .....	58
Figura 10 - Função de confiabilidade FI-FO-008.....	58
Figura 11 - Papel de probabilidade de Weibull da amostra do MH-FO-001 .....	60
Figura 12 - Taxa de falhas MH-FO-001.....	61
Figura 13 - Função de confiabilidade MH-FO-001 .....	62
Figura 14 - Papel de probabilidade de Weibull da amostra da PE-FO-051 .....	63
Figura 15 - Taxa de falhas PE-FO-051 .....	64
Figura 16 - Função de confiabilidade PE-FO-051 .....	65
Figura 17 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da PE-FO-052 .....	66
Figura 18 - Taxa de falhas PE-FO-052 .....	67
Figura 19 - Função de confiabilidade PE-FO-052.....	68
Figura 20 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da PF-FO-016.....	70
Figura 21 - Taxa de falhas PF-FO-016.....	71
Figura 22 - Função de confiabilidade PF-FO-016 .....	71
Figura 23 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da PC-CO-001 .....	73
Figura 24 - Taxa de falhas PC-CO-001 .....	74
Figura 25 - Função de confiabilidade PC-CO-001.....	75
Figura 26 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da PC-CO-003.....	77
Figura 27 - Taxa de falhas PC-CO-003.....	78
Figura 28 - Função de confiabilidade PC-CO-003.....	78
Figura 29 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da PC-CO-004.....	80
Figura 30 - Taxa de falhas PC-CO-004.....	81
Figura 31 - Função de confiabilidade PC-CO-004.....	82

Figura 32 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da SH-CO-001 .....	84
Figura 33 - Taxa de falhas SH-CO-001 .....	85
Figura 34 - Função de confiabilidade SH-CO-001.....	85
Figura 35 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da SH-CO-002.....	87
Figura 36 - Taxa de falhas SH-CO-002.....	88
Figura 37 - Função de confiabilidade SH-CO-002.....	89
Figura 38 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da SH-CO-003.....	91
Figura 39 - Taxa de falhas SH-CO-003.....	92
Figura 40 - Função de confiabilidade SH-CO-003.....	92
Figura 41 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da SH-CO-004.....	94
Figura 42 - Taxa de falhas SH-CO-004.....	95
Figura 43 - Função de confiabilidade SH-CO-004.....	96
Figura 44 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da SH-CO-005.....	98
Figura 45 - Taxa de falhas SH-CO-005.....	99
Figura 46 - Função de confiabilidade SH-CO-005.....	99
Figura 47 - $R(t)$ para o sistema produtivo em série .....	100
Figura 48 - $R(t)$ para o sistema produtivo em paralelo até Ø25,4mm.....	101
Figura 49 - $R(t)$ para o sistema produtivo em paralelo de Ø26mm até Ø34mm .....	102
Figura 50 - $R(t)$ para o sistema produtivo em paralelo de Ø64mm até Ø120mm ....	103
Figura 51 - $R(t)$ para o sistema produtivo em paralelo de perfis.....	104
Figura 52 - Diagrama de blocos sistema produtivo completo até Ø25,4mm .....	105
Figura 53 - $R(t)$ para o sistema produtivo completo até Ø25,4mm.....	106
Figura 54 - Diagrama de blocos sistema produtivo completo de Ø26 até Ø34mm .	106
Figura 55 - $R(t)$ para o sistema produtivo completo de Ø26 até Ø34mm .....	107
Figura 56 - Diagrama de blocos sistema produtivo completo de Ø35 até Ø63mm .	107
Figura 57 - $R(t)$ para o sistema produtivo completo de Ø35 até Ø63mm .....	108
Figura 58 - Diagrama de blocos sistema produtivo completo de Ø64 até Ø120mm	109
Figura 59 - $R(t)$ para o sistema produtivo completo de Ø64 até Ø120mm .....	109
Figura 60 - Diagrama de blocos sistema produtivo completo de perfis .....	110
Figura 61 - $R(t)$ para o sistema produtivo completo de perfis.....	110

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características das estratégias de manutenção .....	30
Quadro 2 - Relação entre as fases do ciclo de vida e estratégias de manutenção ...	39
Quadro 3 - Detalhamento das etapas do MCC .....	41
Quadro 4 - Critérios sugeridos de avaliação de severidade.....	51
Quadro 5 - Critérios sugeridos de avaliação de ocorrências.....	52
Quadro 6 - Critérios sugeridos de avaliação de detecção.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ferramentas utilizadas para promover a qualidade na manutenção.....	21
Tabela 2 - Aplicação dos recursos na manutenção.....	23
Tabela 3 - <i>TBF</i> de FI-FO-008.....	56
Tabela 4 - <i>TTR</i> de FI-FO-008.....	56
Tabela 5 - Ajustes da distribuição da amostra do FI-FO-008.....	56
Tabela 6 - Modelo de máxima verossimilhança para FI-FO-008.....	57
Tabela 7 - <i>TBF</i> de MH-FO-001.....	59
Tabela 8 - <i>TTR</i> de MH-FO-001.....	59
Tabela 9 - Ajustes da distribuição da amostra do MH-FO-001.....	59
Tabela 10 - Modelo de máxima verossimilhança para MH-FO-001.....	60
Tabela 11 - <i>TBF</i> de PE-FO-051.....	62
Tabela 12 - <i>TTR</i> de PE-FO-051.....	62
Tabela 13 - Ajustes da distribuição da amostra da PE-FO-051.....	63
Tabela 14 - Modelo de máxima verossimilhança para PE-FO-051.....	64
Tabela 15 - <i>TBF</i> de PE-FO-052.....	65
Tabela 16 - <i>TTR</i> de PE-FO-052.....	65
Tabela 17 - Ajustes da distribuição da amostra da PE-FO-052.....	66
Tabela 18 - Modelo de máxima verossimilhança para PE-FO-052.....	67
Tabela 19 - <i>TBF</i> de PF-FO-016.....	68
Tabela 20 - <i>TTR</i> de PF-FO-016.....	69
Tabela 21 - Ajustes da distribuição da amostra da PF-FO-016.....	69
Tabela 22 - Modelo de máxima verossimilhança para PF-FO-016.....	70
Tabela 23 - <i>TBF</i> de PC-CO-001.....	72
Tabela 24 - <i>TTR</i> de PC-CO-001.....	72
Tabela 25 - Ajustes da distribuição da amostra da PC-CO-001.....	73
Tabela 26 - Modelo de máxima verossimilhança para PC-CO-001.....	74
Tabela 27 - <i>TBF</i> de PC-CO-003.....	75
Tabela 28 - <i>TTR</i> de PC-CO-003.....	76
Tabela 29 - Ajustes da distribuição da amostra da PC-CO-003.....	76
Tabela 30 - Modelo de máxima verossimilhança para PC-CO-003.....	77
Tabela 31 - <i>TBF</i> de PC-CO-004.....	79
Tabela 32 - <i>TTR</i> de PC-CO-004.....	79

Tabela 33 - Ajustes da distribuição da amostra da PC-CO-004.....	80
Tabela 34 - Modelo de máxima verossimilhança para PC-CO-004.....	81
Tabela 35 - TBF de SH-CO-001 .....	82
Tabela 36 - TTR de SH-CO-001 .....	83
Tabela 37 - Ajustes da distribuição da amostra da SH-CO-001 .....	83
Tabela 38 - Modelo de máxima verossimilhança para SH-CO-001.....	84
Tabela 39 - TBF de SH-CO-002.....	86
Tabela 40 - TTR de SH-CO-002.....	86
Tabela 41 - Ajustes da distribuição da amostra da SH-CO-002.....	87
Tabela 42 - Modelo de máxima verossimilhança para SH-CO-002.....	88
Tabela 43 - TBF de SH-CO-003.....	89
Tabela 44 - TTR de SH-CO-003.....	90
Tabela 45 - Ajustes da distribuição da amostra da SH-CO-003.....	90
Tabela 46 - Modelo de máxima verossimilhança para SH-CO-003.....	91
Tabela 47 - TBF de SH-CO-004.....	93
Tabela 48 - TTR de SH-CO-004.....	93
Tabela 49 - Ajustes da distribuição da amostra da SH-CO-004.....	94
Tabela 50 - Modelo de máxima verossimilhança para SH-CO-004.....	95
Tabela 51 - TBF de SH-CO-005.....	96
Tabela 52 - TTR de SH-CO-005.....	97
Tabela 53 - Ajustes da distribuição da amostra da SH-CO-005.....	97
Tabela 54 - Modelo de máxima verossimilhança para SH-CO-005.....	98
Tabela 55 – Demanda total por máquina em horas no mês.....	114
Tabela 56 - IROG por máquina no mês .....	114
Tabela 57 - Capacidade nominal de cada máquina por mês em horas .....	115
Tabela 58 - Capacidade real de cada máquina por mês em horas.....	115
Tabela 59 - Diferença temporal em unidade de tempo .....	116
Tabela 60 - Tabela FMEA do forno FI-FO-008.....	121
Tabela 61 - Tabela FMEA do martelo MH-FO-001.....	129
Tabela 62 - Resultados modelagem quantitativa máquinas.....	132
Tabela 63 - Comparativo resultados dos sistemas produtivos .....	134

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
AV	<i>Availability</i>
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i>
CO	Corte
CODAS	<i>Combinative Distance Based Assessment</i>
D	Detecção
DMG	<i>Decision Making Grid</i>
FANP	<i>Fuzzy Analytic Network Process</i>
FI	Forno a Indução
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FO	Forjaria
GRA	<i>Grey Relational Analysis</i>
IQA	Instituto da Qualidade Automotiva
IROG	Índice de Rendimento Operacional Global
JIT	<i>Just in Time</i>
JKD	<i>Jack-Knife Diagram</i>
LFPP	<i>Logarithmic Fuzzy Preference Programming</i>
MCC	Manutenção Centrada na Confiabilidade
MCDM	<i>Multi Criteria Decision Making</i>
MH	Martelo Hidráulico
MP	Matéria Prima
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NHPP	<i>Non-Homogeneous Poisson Process</i>
O	Ocorrência
PC	Prensa de Corte

PE	Prensa Excêntrica
PF	Prensa de Fricção
PM	<i>Preventive Maintenance</i>
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations</i>
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
S	Severidade
SH	Serra
SM	<i>Shutdown Maintenance</i>
TBF	<i>Time Between Failure</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
TQM	<i>Total Quality Management</i>
TTR	<i>Time To Repair</i>
VSM	<i>Value Stream Mapping</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 Contexto e definição do problema.....	17
1.2 Objetivos .....	20
1.3 Justificativa.....	20
1.4 Delimitações do trabalho.....	27
1.5 Estrutura da dissertação .....	27
<b>2 REVISÃO TEÓRICA</b> .....	<b>29</b>
2.1 Evolução da manutenção .....	29
2.2 Classificação da manutenção .....	31
2.3. Manutenção centrada na confiabilidade .....	33
2.4 Funções de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade .....	34
2.5 Curva da banheira .....	37
2.6 Análise de Modos de Falha e Efeito - FMEA .....	40
2.6.1 Tabela FMEA .....	42
2.7 Definição do recurso gargalo.....	44
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>46</b>
3.1 Método de pesquisa: modelagem quantitativa.....	48
3.2 Método de pesquisa: modelagem qualitativa .....	50
<b>4 MODELAGEM QUANTITATIVA</b> .....	<b>55</b>
4.1 Forjamento - primeira máquina: FI-FO-008 .....	55
4.2 Forjamento - segunda máquina: MH-FO-001 .....	59
4.3 Forjamento - terceira máquina: PE-FO-051.....	62
4.4 Forjamento - quarta máquina: PE-FO-052.....	65
4.5 Forjamento - quinta máquina: PF-FO-016 .....	68
4.6 Corte: PC-CO-001 .....	72
4.7 Corte: PC-CO-003 .....	75
4.8 Corte: PC-CO-004 .....	79
4.9 Corte: SH-CO-001 .....	82
4.10 Corte: SH-CO-002 .....	86
4.11 Corte: SH-CO-003 .....	89
4.12 Corte: SH-CO-004 .....	93
4.13 Corte: SH-CO-005 .....	96

4.14 Sistema produtivo: forjamento .....	100
4.15 Sistema produtivo: corte .....	101
4.16 Sistema produtivo completo .....	105
4.17 Estratégia de manutenção para as máquinas.....	111
5 MODELAGEM QUALITATIVA.....	113
5.1 Gargalo da linha de forjamento.....	113
5.2 FMEA FI-FO-001 .....	116
5.3 FMEA MH-FO-001 .....	125
6 CONCLUSÃO .....	132
REFERÊNCIAS.....	135
APÊNDICE A – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DE MÁQUINA POR ITEM.....	142
APÊNDICE B - QUANTIDADE DE ITENS PRODUZIDOS E HORAS APONTADAS .....	147
APÊNDICE C - DEMANDA MENSAL POR MÁQUINA DE CADA ITEM .....	152

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da competitividade tornou importante para as empresas manter baixos prazos de entrega e custos de fabricação dos produtos. Com isto, cresce a importância da gestão estratégica da manutenção industrial, pois excessos de quebras podem prejudicar os dois objetivos. Logo, as empresas buscam continuamente novas estratégias para melhorar a eficácia de suas operações. O foco agora é direcionado para manter o equipamento operacional ou devolvê-lo à produção o mais rápido possível, sendo então, a otimização da manutenção e a seleção das estratégias de manutenção parte fundamental para o atingimento desses objetivos (ALASWAD; XIANG, 2017; KUMAR et al., 2013).

A seleção de técnicas e estratégias de manutenção tem significado estratégico, pois a disponibilidade do sistema produtivo está diretamente conectada ao desempenho econômico das organizações. Misoczky et al. (2001) apresentam a definição de desempenho como o resultado de atividades, quantificável através de medidas como o lucro contábil ou o retorno do investimento, por exemplo, sendo sinônimo de eficiência. Atualmente, as técnicas de manutenção são selecionadas principalmente com base em necessidades técnicas específicas do sistema produtivo, juntamente com fatores econômicos. Em outras palavras, a opção de menor custo e tecnicamente viável é normalmente selecionada. Isso pode causar vários problemas, já que muitas vezes a opção de menor custo não é a melhor opção a longo prazo, bem como das perspectivas de propriedade de custo total (BAIDYA et al., 2018).

Para Rastegari e Salonen (2013), a manutenção, assim como todas as funções de suporte à produção, é considerada um centro de custos. Porém, identificando os objetivos estratégicos adequados de manutenção e implementando uma estratégia bem formulada, as indústrias podem aumentar o retorno sobre o investimento de suas despesas de manutenção. Nesse sentido a manutenção centrada na confiabilidade (MCC) pode ser aplicada, pois seu principal objetivo é reduzir os custos de manutenção, focando nas funções mais importantes do sistema, e evitando ou retirando ações de manutenção que não são estritamente necessárias. Em um programa de manutenção já existente, o resultado de uma análise de MCC, muitas vezes, será a eliminação de tarefas de manutenção preventivas ineficientes (RAUSAND, 1998).

A MCC é definida por Moubray (1997) como um processo usado para determinar o que deve ser feito para garantir que qualquer ativo físico continue a fazer o que seu usuário deseja que ele faça em seu contexto operacional atual. Nesse contexto se determina qual a estratégia de manutenção será seguida para tratar um determinado equipamento, manutenção corretiva, preventiva ou preditiva. Conforme Rausand (1998) a decisão de mudar o sistema de planejamento da manutenção para MCC pode exigir investimentos e seus efeitos podem levar anos até serem percebidos. Para Sellitto et al (2002) uma das principais decisões que a aplicação sistemática da MCC oferece é a possibilidade de decidir que estratégia de manutenção adotar em uma máquina. A MCC usa técnicas de confiabilidade de modo racional e sistemático para definir a estratégia de manutenção necessária para manter o sistema em operação (DESHPANDE; MODAK, 2002; SELLITTO; BRUSIUS JR, 2017; WARD et al, 1996).

### 1.1 Contexto e definição do problema

O tema dessa dissertação é a aplicação da manutenção centrada na confiabilidade em uma empresa da indústria metal-mecânica de manufatura, mais especificamente em seus setores de forjaria e corte de matéria prima. O objetivo da manutenção é preservar as funções de equipamentos e/ou sistemas, não apenas coloca-los a operar novamente (ARNO et al., 2015). As estratégias de manutenção podem ser classificadas como manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva, além da manutenção emergencial, uma vertente da manutenção corretiva. Na Figura 1 pode-se verificar como se comporta um equipamento sob cada uma das estratégias de manutenção.

Figura 1 - Comportamento esperado para as estratégias de manutenção



Fonte: Alrabghi e Tiwari (2015)

A manutenção corretiva ocorre quando um equipamento falha, resultando em parada inesperada e alto custo de manutenção. A manutenção corretiva pode ser separada em dois tipos, emergencial e programada. Na primeira, o reparo é imediato e a troca de peças ocorre sem estudos aprofundados. As causas dos erros continuam e as falhas provavelmente se repetirão. Na segunda, há redundância de equipamento e o mesmo pode ser retirado de operação. A engenharia descobre a causa do problema e a corrige eliminando a falha e impedindo que ocorra novamente. A manutenção preventiva está programada para minimizar o impacto de uma falha inesperada. Geralmente, a manutenção preventiva consome menos recursos em comparação a manutenção corretiva e pode ser acomodado no planejamento da produção. Podem ser consideradas atividades de manutenção preventiva atividades simples como limpeza de filtros, lubrificação, substituição de peças determinadas, entre outras, realizadas a frequência pré-determinada, evitando a falha de um componente crítico que pode ter custo elevado e prazo de entrega alto. Como o planejamento da produção e o mercado mudam dinamicamente, a manutenção preventiva pode ser realizada sem necessidade. Para garantir que a manutenção preventiva ocorra somente quando necessário, a manutenção preditiva foi introduzida. Essa estratégia de manutenção pode ser feita em uma forma de inspeções regulares para avaliar o desgaste dos equipamentos ou na forma de sensores que transmitem dados para softwares de diagnóstico. Logo, as atividades de manutenção só serão acionadas quando o desgaste atingir um determinado nível (ALRABGHI; TIWARI, 2015; SELLITTO, 2005).

A MCC surgiu de avanços de conceitos e técnicas de gestão da manutenção. A análise de falhas, o monitoramento sob condição e as análises estatísticas, foram determinantes no surgimento dessa metodologia que, conforme Vishnu e Regikumar (2016), podem ser consideradas uma combinação ótima de práticas de manutenção reativa, baseada em intervalo de tempo, preditivas e proativas.

Um componente central da MCC, é o FMEA, uma ferramenta utilizada pelos engenheiros de segurança e confiabilidade de sistema para identificar componentes/peças/funções críticos cuja falha levará a resultados indesejáveis, como uma parada de produção ou até mesmo acidentes. É usado como uma técnica prospectiva de avaliação de risco, utilizada em vários setores para melhorar a segurança e a confiabilidade de sistemas, produtos, processos e serviços. O principal objetivo da FMEA é identificar os modos de falha mais importantes, de acordo com as

restrições de recursos, e fornecer informações valiosas para alcançar a melhoria contínua da qualidade e disponibilidade (FILHO et al., 2017).

A abordagem da MCC segue alguns preceitos destacados por Arno et al. (2015) tais como:

- a) o foco no sistema como um todo, preocupando-se mais em manter a função geral do sistema ou equipamento do que componentes individuais;
- b) a confiabilidade como base para tomadas de decisão, ou seja, as características das falhas devem ser entendidas para se determinar a eficácia de uma manutenção preventiva, por exemplo;
- c) a MCC é guiada pela segurança em primeiro lugar e após pela economia, quando a segurança não é um problema, a escolha da estratégia, por exemplo, deve ser justificada por benefícios econômicos;
- d) a manutenção não pode melhorar a confiabilidade inerente de um projeto, apenas pode sustentar o nível da confiabilidade ao longo da vida útil do equipamento;
- e) a MCC é um processo contínuo no qual as informações obtidas pela operação e pelas características de falha experimentadas são usadas para melhorar o processo.

A função de risco  $h(t)$  é a mais utilizada das medidas de confiabilidade. A maioria dos produtos manufaturados costuma apresentar uma função de risco conhecida como curva da banheira. A curva da banheira (do inglês *bath-tube curve*), sintetiza a taxa de falha de um equipamento ao longo de seu ciclo de vida, que contempla desde o início de sua operação até o fim, quando não há mais possibilidade de operar, seja por desgaste excessivo ou por decisão da empresa de descartar o equipamento. Devido à alta taxa de falhas no período de mortalidade infantil e mortalidade senil, a curva sugere três regiões de taxa de falhas. A região central é conhecida como a região de maturidade (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; ROESCH, 2012; SELLITTO, 2005).

O primeiro período, conhecido como mortalidade infantil, é representado pelas falhas originadas de erros de projeto ou montagem, inclui todas as falhas que ocorrem antes da fase estável da curva, nesse período a estratégia de manutenção mais indicada é a manutenção corretiva, sanando as falhas à medida que são identificadas. O segundo período, conhecido como período de maturidade, é representado por uma taxa de falhas contínua a longo do tempo, essas falhas são falhas pouco previsíveis,

puramente aleatórias, nesse período a estratégia de manutenção mais indicada é a manutenção preditiva, onde monitora-se o equipamento para detectar o fim da maturidade. No terceiro período, conhecido como mortalidade senil, ocorre um aumento na taxa de falha, causada pelo envelhecimento do equipamento, nesse período é indicado a manutenção preventiva, já que as falhas são inevitáveis (DE FARIA et. al., 2015; SELBITTO, 2005).

Conforme Fraser et. al. (2015) a MCC realiza uma avaliação física completa dos equipamentos para projetar um programa de manutenção que garantirá sua confiabilidade contínua. A MCC é um campo de conhecimento que pode auxiliar na análise e na formulação de estratégias de manutenção de empresas que necessitam de equipamentos de porte e complexos para cumprir sua missão e foi utilizada nessa pesquisa.

## **1.2 Objetivos**

A partir disso surge a questão de pesquisa dessa dissertação: Como aplicar a manutenção centrada na confiabilidade, quanti e qualitativamente, nas máquinas dos setores de forja e corte de matéria prima de uma planta industrial de uma forjaria? Partindo dessa questão de pesquisa, seguem os objetivos propostos para o estudo.

A seguir serão apresentados os objetivos, geral e específicos dessa dissertação.

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver um método para definir a estratégia de manutenção de uma empresa metal mecânica do ramo de forjados.

Os objetivos específicos dessa dissertação são os seguintes:

- a) encontrar modelos individuais e sistêmicos para máquinas e planta;
- b) definir as estratégias de manutenção para as máquinas;
- c) identificar as máquinas críticas da planta (linha de forja); e
- d) identificar principais modos de falha das máquinas críticas.

## **1.3 Justificativa**

A aplicação da MCC neste trabalho se justifica pela crescente abordagem do tema na indústria brasileira, como pode-se observar na Tabela 1, onde é constatado

o crescimento, nos últimos anos, da utilização de ferramentas alternativas para promover a qualidade na indústria, como a MCC.

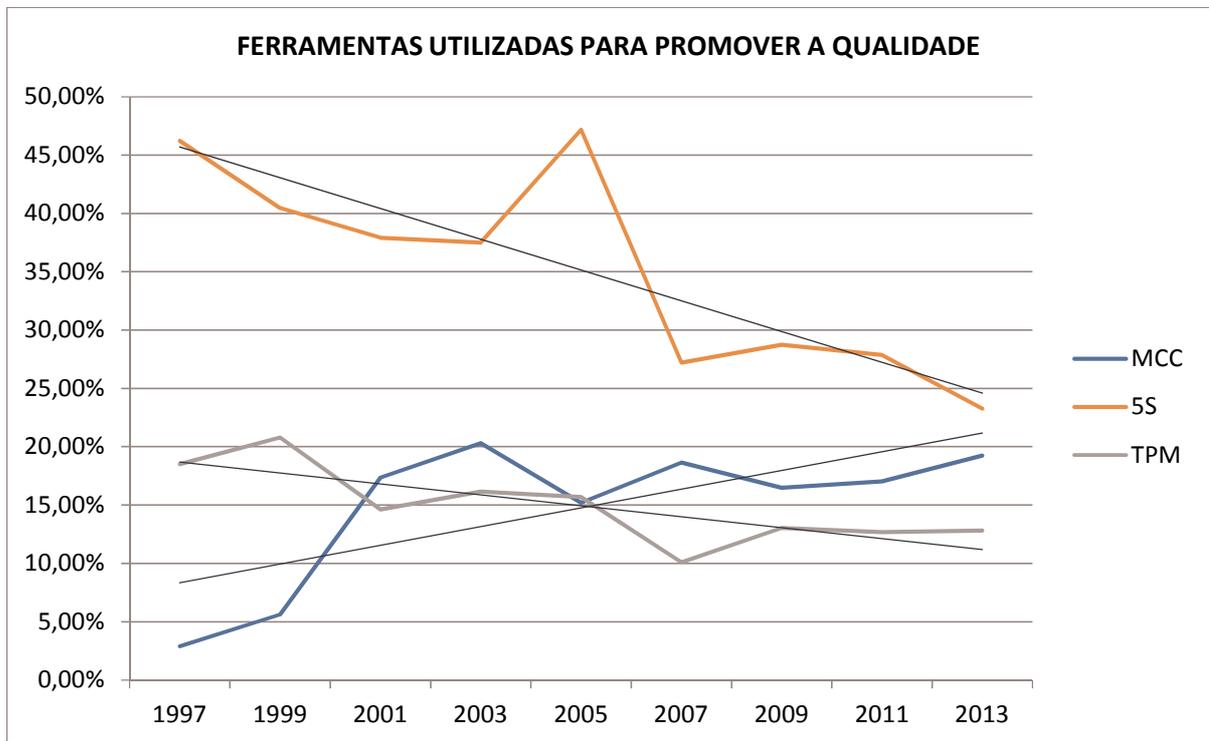
Tabela 1 - Ferramentas utilizadas para promover a qualidade na manutenção

Ano	MCC	5S	FMEA	RCFA	CCQ	TPM	6 Sigma	Outros
1997	2,89%	46,24%	-	-	12,14%	18,50%	-	20,23%
1999	5,62%	40,45%	-	-	16,29%	20,79%	-	16,85%
2001	17,35%	37,90%	-	-	11,42%	14,61%	-	18,72%
2003	20,31%	37,50%	-	-	8,33%	16,15%	5,73%	11,98%
2005	15,20%	47,18%	-	-	10,78%	15,69%	7,35%	9,80%
2007	18,65%	27,22%	22,02%	17,13%	-	10,09%	0,92%	3,98%
2009	16,48%	28,74%	14,94%	16,09%	-	13,03%	10,73%	0,00%
2011	17,03%	27,86%	17,34%	15,79%	-	12,69%	9,29%	0,00%
2013	19,25%	23,26%	16,31%	17,91%	-	12,83%	10,43%	0,00%

Fonte: ABRAMAN (2013)

Na Figura 2 pode-se constatar o comportamento referente a utilização, ao longo dos anos, das três ferramentas de maior porcentagem de utilização obtidas na pesquisa realizada pela ABRAMAN. Essas três ferramentas utilizadas para promover a qualidade dos produtos na indústria, são a MCC, o 5S e o TPM (*total productive maintenance* – manutenção produtiva total). Observando-se as linhas de tendência, destaca-se um aumento considerável da MCC ocorrendo a partir dos anos 2000 em relação às demais alternativas, cuja utilização decresce. Esse aumento coincide com a chegada da pesquisa de Moubray (1997) ao Brasil. A pesquisa realizada pela ABRAMAN em 2013, foi uma *survey* realizada com 151 empresas brasileiras, de diversos ramos de atuação, e vinculadas a associação.

Figura 2 - Tendência da utilização das principais ferramentas para promover a qualidade



Fonte: Autor (2019)

Além da MCC, destacam-se na indústria, em termos de utilização, o TPM e o 5S. O TPM é uma metodologia de melhoria conduzida pela produção industrial, um novo paradigma da manufatura, que teve uma rápida, mas contínua evolução no Japão. De acordo com Nakajima (1988), a filosofia do TPM combina manutenção preventiva com conceitos japoneses do controle total da qualidade (*total quality control* – TQC) e do total envolvimento dos funcionários, com o objetivo de promover a manutenção sistêmica dos equipamentos, o que otimiza sua eficácia, elimina as quebras e promove a manutenção autônoma pelo operador. O TPM visa promover a cultura do sentimento de propriedade do operador em relação a máquina, desenvolvendo seu aprendizado em relação a ela para que possa se envolver no diagnóstico de problemas e propor melhorias no equipamento, aumentando sua vida. É um sistema de manutenção total que previne falhas, atua como uma manutenção preventiva e incentiva a manutenção relacionada à melhoria, com o objetivo final de evitar perdas e desperdícios. (AHUJA; KHAMBA, 2008; HOOI; LEONG, 2017)

O 5S é uma ferramenta de gerenciamento desenvolvida por Takshi Osada nos anos 80 com o objetivo de criar e sustentar um ambiente de melhor qualidade,

produtividade e segurança nas empresas. Os 5S's representam, conforme Osada (1991), 5 palavras oriundas da indústria japonesa: *Seiri* (utilização), *Seiton* (organização), *Seiso* (limpeza), *Seiketsu* (padronização) e *Shitsuke* (disciplina). Um programa 5S, quando implantado em uma empresa, desenvolve orgulho próprio, respeito pelos outros e trabalho em equipe entre os funcionários, solucionando os problemas da organização para o crescimento com o esforço coletivo. Também desenvolve um senso de utilização e organização sistemática para obter resultados mais eficientes no local de trabalho (RANDHAWA; AHUJA, 2017).

A definição correta da estratégia de manutenção a ser aplicada é importante para a gestão estratégica da manutenção. Conforme dados da ABRAMAN (Tabela 2) a maioria das horas de manutenção aplicadas, nas empresas participantes da pesquisa, são representadas por atividades de manutenção corretiva e preventiva. Na tabela, os valores percentuais representam as horas de serviços realizados sobre as horas totais de trabalho. Estratégias de manutenção mais atuais como a manutenção preditiva, são menos utilizadas.

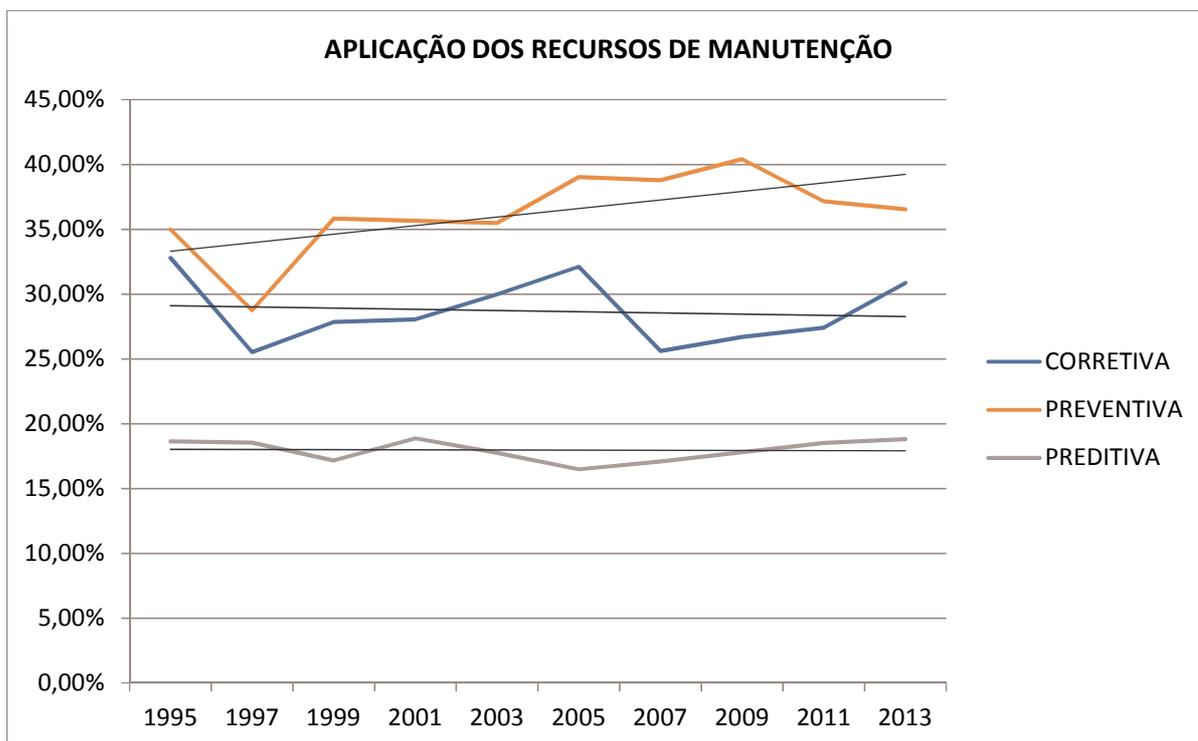
Tabela 2 - Aplicação dos recursos na manutenção

<b>Ano</b>	<b>Manutenção Corretiva</b>	<b>Manutenção Preventiva</b>	<b>Manutenção Preditiva</b>	<b>Outros</b>
1995	32,80%	35,00%	18,64%	13,56%
1997	25,53%	28,75%	18,54%	27,18%
1999	27,85%	35,84%	17,17%	19,14%
2001	28,05%	35,67%	18,87%	17,41%
2003	29,98%	35,49%	17,76%	16,77%
2005	32,11%	39,03%	16,48%	12,38%
2007	25,61%	38,78%	17,09%	18,51%
2009	26,69%	40,41%	17,81%	15,09%
2011	27,40%	37,17%	18,51%	16,92%
2013	30,86%	36,55%	18,82%	13,77%

Fonte: ABRAMAN (2013)

Analisando as linhas de tendência apresentadas na Figura 3 constata-se um leve aumento na utilização das horas com manutenção preditiva e uma leve diminuição em relação a manutenção corretiva. Porém, a manutenção preventiva, além de ser a que possui maior número de horas utilizadas, apresenta uma tendência a crescer ainda mais.

Figura 3 - Tendência da aplicação dos recursos de manutenção



Fonte: Autor (2019)

A dissertação se justifica no meio industrial pelo crescimento da utilização da MCC na indústria a partir dos anos 2000, apesar de ainda ser menor que a de outras metodologias, como o TPM e o 5S. A orientação para a aplicação correta de cada uma das estratégias de manutenção apresentadas também será de utilidade para as indústria, visto a maior utilização das manutenções corretiva e preventiva ao longo dos anos.

Foi, também, realizada uma revisão sistemática da literatura, considerando artigos num período de 5 anos (2014 a 2018), nas bases *Scopus*, *Web of Science* e EBSCO, com as palavras chaves *maintenance*, *strategy* e *selection*. O objetivo dessa revisão foi de identificar o que pesquisadores, internacionais e nacionais, pesquisam em relação a seleção de estratégias de manutenção.

As pesquisas nas bases ocorreram no dia 14/06/2018, e seguiram as seguintes etapas de pesquisa:

1. Definição da pesquisa por artigos no período de 5 anos;
2. Escolha das três palavras chave;
3. Escolha das categorias conforme o tema pesquisado;
4. Análise de títulos;

5. Eliminação de artigos duplicados; e
6. Análise de resumos.

Foram obtidos no final da execução desse protocolo de pesquisa, 19 artigos para leitura, dois deles são revisões da literatura, abordando a tomada de decisão baseada em multicritérios para a definição de estratégias de manutenção (SHAFIEE, 2015; VELMURUGAN; DHINGRA, 2015).

Os 17 artigos restantes puderam ser separados conforme a metodologia utilizada, os que utilizaram o *Analytic Hierarchical Process* (AHP) para a seleção de estratégias de manutenção, os que utilizaram o processo de rede analítico, *analytical network process* (ANP), para a seleção de estratégias de manutenção, e os artigos que não abordaram a definição de estratégias de manutenção através da tomada de decisão baseada em multicritérios.

Identificou-se que nove artigos tratam a seleção da estratégia de manutenção utilizando AHP. O AHP utiliza o conhecimento de especialistas para gerar matrizes com os critérios definidos para a seleção de manutenção. Os autores, em alguns casos, consideram o risco nas análises utilizando o AHP. Essa metodologia é então combinada com outras, como a Delphi, PROMOTHEE, TOPSIS, *fuzzy*, CODAS, GRA e LFPP, utilizadas para auxiliar o ranqueamento e seleção da estratégia mais adequada, todos apresentaram estudos de caso para validar os modelos propostos, obtendo como resultados manutenção preditiva e preventiva, como as mais adequadas a cada um de seus estudos de caso (AZADEH; ABDOLHOSSEIN ZADEH, 2016; DACHYAR; NURCAHYO; TOHIR, 2018; EMOVON; NORMAN; MURPHY, 2018; GE et al., 2017; KARTHIK et al., 2017; KIRUBAKARAN; ILANGKUMARAN, 2016; LAZAKIS; ÖLÇER, 2014; ÖZCAN; ÜNLÜSOY; EREN, 2017; PANCHAL et al., 2017; SEITI et al., 2017; SEITI; HAFEZALKOTOB; FATTAHI, 2018).

Dois artigos utilizaram o processo de rede analítico para selecionar estratégias de manutenção. Um dos artigos desenvolveu um modelo híbrido de MCDM para avaliar e selecionar uma estratégia de manutenção apropriada para bombas na indústria do papel. Combinou o ANP, GRA e TOPSIS. Para validar o modelo realizou um estudo de caso, obtendo a manutenção preventiva como a mais adequada para as bombas da empresa. O outro artigo estabeleceu uma nova abordagem para selecionar a estratégia de manutenção ideal baseada no *fuzzy analytical network process* (FANP), que compõe critérios e opções. Realizou um estudo de caso em uma subestação de energia. Ao implementar o modelo, obteve a estratégia de manutenção

preventiva como a mais adequada (BORJALILU; GHAMBARI, 2018; KIRUBAKARAN; ILANGKUMARAN, 2015).

A seleção de uma estratégia de manutenção adequada é um processo complexo, além disso, a falta de registros de falhas e mudanças constantes nas condições das máquinas a torna ainda mais complicada. Assim, a tomada de decisão também depende das opiniões dos especialistas, mas essas opiniões carregam algum tipo de risco e incerteza, logo, a confiabilidade das avaliações é questionável. Um exemplo é o AHP, amplamente utilizado para a seleção de estratégias de manutenção no campo MCDM (*Multiple Criteria Decision-Making*). Mas os métodos AHP tradicionais ou híbridos produzem múltiplos resultados de prioridade de conflito, ou têm estruturas de algoritmo complicadas que são instáveis para obter uma solução ideal (GE et al., 2017; SEITI et al., 2017; SEITI; HAFEZALKOTOB; FATTAHI, 2018).

Apenas quatro artigos não abordaram a definição de estratégias de manutenção através da tomada de decisão baseada em multicritérios. Um deles abordou a definição de uma metodologia sistemática para seleção de estratégias de manutenção com base na análise de confiabilidade de dados históricos de falhas. Neste caso foi utilizado o processo de Poisson não Homogêneo (NHPP – *Non Homogeneous Poisson Processes*) ajustando as melhores distribuições conforme cada conjunto de dados. E definindo a melhor estratégia de manutenção a partir do comportamento das taxas de falhas, onde obteve a manutenção preventiva como a mais indicada para seu estudo de caso. Outro artigo desenvolveu um modelo para definição da estratégia de manutenção mais adequada a instalações de distribuição de energia. Utilizou uma combinação da Cadeia de Markov para obtenção da disponibilidade do sistema e do modelo de tomada de decisão, MACBETH, para quantificar opiniões de especialistas e classificar as estratégias de manutenção mais adequadas. Nesse artigo o estudo de caso, resultou em uma combinação das estratégias de manutenção corretiva, preventiva e preditiva. Outro abordou o desenvolvimento de uma metodologia para análise da causa raiz e seleção de estratégia de manutenção mais adequada utilizando uma estrutura de exploração de dados incorporada a análise multivariada e de cluster. Na seleção de estratégias a metodologia proposta sugere estratégias de manutenção para solução de causas mais específicas, em detrimento a causas e soluções mais gerais. O último utilizou duas ferramentas para a alocação de estratégias de manutenção, priorizando o tempo de inatividade da máquina de acordo com dois importantes critérios de tempo de

inatividade: frequência e duração do tempo de inatividade. O DMG e o JKD alocam estratégias de manutenção apropriadas dependendo da localização das máquinas em determinados diagramas. O JKD foi usado para priorizar o tempo de inatividade da máquina, enquanto o DMG foi usado para alocar estratégias de manutenção (CARNERO; GÓMEZ, 2017; CHEMWENO et al., 2016; NOURI GHARAHASANLOU et al., 2017; SEECHARAN; LABIB; JARDINE, 2018).

A dissertação se justifica no meio acadêmico pela pouca abordagem da definição de estratégias de manutenção através de modelagem e simulação quantitativa nos últimos 5 anos.

#### **1.4 Delimitações do trabalho**

Esta pesquisa é um estudo de caso. Nesse estudo de caso optou-se por analisar apenas dois setores de uma empresa do ramo de forjados. Uma linha de produção de forjados em si, composta por máquinas em série, e o setor de corte de matéria prima, composto por máquinas em paralelo. A análise, também, ocorreu em um período de tempo determinado.

A aplicação do MCC, nesse caso, buscará definir a estratégia de manutenção mais adequada para cada uma das máquinas, tomando como base os dados do histórico de manutenção de cada uma. Além das funções de confiabilidade e manutenibilidade, disponibilidade e tempo médio entre falhas para as máquinas e sistemas produtivos. O estudo, também, trará a identificação das causas raízes de falhas e seus tratamentos, utilizando a ferramenta FMEA para isso.

#### **1.5 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação será estruturada em sete capítulos, conforme são descritos abaixo:

O capítulo 1 consiste na introdução do trabalho. Apresenta o contexto e definição do problema, os objetivos, justificativa, as delimitações do trabalho e sua estrutura.

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura realizada para fundamentar a pesquisa. Serão abordados assuntos tais como: manutenção, manutenção centrada

na confiabilidade, funções de confiabilidade, curva da banheira, FMEA e a definição de gargalo.

O capítulo 3 apresenta a metodologia da pesquisa. Está dividida em quantitativa e qualitativa, conforme as modelagens que serão realizadas.

O capítulo 4 apresenta a modelagem quantitativa. Essa etapa apresentará a aplicação da MCC a uma linha de produção em série e paralela, para a obtenção das estratégias de manutenção mais adequadas para cada máquina, suas disponibilidades e a disponibilidade do sistema.

O capítulo 5 apresenta a modelagem qualitativa. Essa etapa apresentará a definição dos gargalos e máquinas críticas da linha de forjamento. Em seguida a aplicação da ferramenta FMEA para a identificação e análise dos modos e causas de falhas ocorrentes nessas máquinas.

O capítulo 6 será apresentada a conclusão da pesquisa e suas considerações finais. Seguida das referências utilizadas na pesquisa.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

A manutenção possui diversas definições conforme diferentes autores, porém apresentam elementos comuns que possibilitam identificar seu conceito e função. Rastegari e Salonen (2013) citam como objetivo chave da manutenção a otimização do ciclo de vida do total de um equipamento, o que significa maximizar a disponibilidade e a confiabilidade dos equipamentos para produzir a quantidade desejada de produtos, com as especificações de qualidade exigidas e em tempo hábil.

A ABNT NBR 5462 (1994) define a manutenibilidade, ou manutenção, como a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, mediante condições de uso já especificadas, quando submetido à manutenção sob condições predeterminadas e usando recursos e procedimentos padrão.

### 2.1 Evolução da manutenção

De acordo com Patidar et al. (2017), as estratégias de manutenção evoluíram significativamente nos últimos 50 anos. Passaram de quebras, para preventivas, proativas, a uma abordagem sinérgica. O Quadro 1 apresenta essa evolução.

Essa evolução da manutenção pode ser dividida em três gerações, primeira geração, dos anos 40 aos 50, segunda geração, dos anos 60 aos 70, e a terceira geração, dos anos 80 aos 2000 (DESHPANDE; MODAK, 2002; HIGGINS, 2001; PATIDAR; SONI; SONI, 2017).

A primeira geração abrange o período até a Segunda Guerra Mundial, onde a indústria não era altamente mecanizada, o equipamento era simples e superdimensionado. Por isso, a manutenção era fácil, sem necessidade de habilidades significativas. Manutenção caracterizada como reativa, conserto após a quebra.

A segunda geração, a partir da década de 1950, surgiu devido ao aumento da mecanização e o surgimento de máquinas complexas. Assim, foi introduzido o conceito da manutenção preventiva. Na década de 1960, isso consistia principalmente em revisões de equipamentos em intervalos regulares. Planejamento de manutenção e sistemas de controle foram desenvolvidos para controlar os custos de manutenção.

A terceira geração, a partir de meados das décadas de 1970 e 1980, evoluiu da incapacidade das técnicas que existiam frente às exigências da automação que surgiram. Nessa geração surgiram também os requisitos de maior disponibilidade e confiabilidade e qualidade. Aqui houve o surgimento de uma manutenção preditiva e proativa, com a manutenção centrada na confiabilidade e a manutenção produtiva total, e integrada, onde estratégias de manutenção começaram a ser integradas a ferramentas do *Lean Manufacturing* (DE SIQUEIRA, 2005; DESHPANDE; MODAK, 2002; PATIDAR; SONI; SONI, 2017).

Quadro 1 - Características das estratégias de manutenção

<b>Período</b>	<b>Técnicas</b>	<b>Estratégias</b>	<b>Características</b>
1940s e 1950s	Manutenção na quebra (SM - <i>Shutdown Maintenance</i> )	Quebra/ reativa (emergência ou corretiva)	Sem restrições de orçamento, consertado na falha.
1960s e 1970s	Manutenção preventiva (PM - <i>Preventive Maintenance</i> )	Preventiva	Inspeções ou substituições periódicas.
1980s, 1990s e 2000s	Manutenção baseada em condições (CBM – <i>Condition Based Maintenance</i> )	Preditiva	Monitoramento de tendências da vida útil e prognósticos.
1980s, 1990s e 2000s	Manutenção centrada na confiabilidade (RCM – <i>Reliability Centered Maintenance</i> )	Preditiva/ Proativa	<i>Design</i> para confiabilidade e manutenibilidade.
1980s, 1990s e 2000s	Manutenção produtiva total (TPM – <i>Total Productive Maintenance</i> )	Proativa (holística)	Busca pelo zero defeitos/acidentes/quebras
2000s, 2010s, e 2015	TPM integrado com ferramentas do <i>Lean</i> (TQM, VSM, JIT, etc.)	Abordagem sinérgica/práticas integradas	Busca pela melhoria contínua e modelos baseados nas necessidades de cada indústria.

Fonte: Patidar et al. (2017)

## 2.2 Classificação da manutenção

Os autores divergem quanto a classificação das estratégias de manutenção. A manutenção é classificada de acordo com diversos critérios, podendo ser preventiva, preditiva ou corretiva, a última podendo ser ainda emergencial (DING; KAMARUDDIN, 2014; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2018; HIGGINS, 2001; LAFRAIA, 2001; SELLITTO, 2005).

Existem duas escolas que classificam a manutenção, a escola europeia e a nipo-americana. Na escola europeia, as estratégias de manutenção são definidas como Emergencial e Programada, onde existe a substituição ou reparo funcional, a substituição e restauração preventiva, e a reforma (DE SIQUEIRA, 2005). Já a escola nipo-americana classifica a manutenção como emergencial e corretiva, onde o equipamento trabalha até a falha, preventiva e preditiva (SELLITTO, 2005). Nessa pesquisa seguiu-se a tipologia definida pela escola nipo-americana.

Conforme Lafraia (2001) a manutenção corretiva inclui todas as ações necessárias para retornar um sistema ou máquina ao seu estado operacional ou disponível, esta não pode ser planejada. Ocorre durante a operação do equipamento ou sistema, ou seja, quando não se deseja (GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2018). Sua frequência é determinada pela confiabilidade do equipamento. Para Higgins (2001) a manutenção corretiva é diferente de uma manutenção emergencial, e está focada em tarefas regulares e planejadas que objetivam manter todas as máquinas e sistemas críticos da empresa nas melhores condições operacionais. A manutenção corretiva é uma estratégia viável de ser adotada em casos onde as margens de lucro da empresa são grandes. No entanto, a adoção dessa estratégia pode causar muitas perdas produtivas, danos a equipamentos pessoas e ao sistema, além de criar um ambiente onde as falhas são inesperadas (DING; KAMARUDDIN, 2014). Já a norma brasileira ABNT NBR 5462 (1994) define a manutenção corretiva como uma manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida. De acordo com Sellitto (2005) a manutenção corretiva é dividida em dois tipos. Na primeira, o reparo é imediato e a troca de peças ocorre sem estudos aprofundados. As causas dos erros continuam. Na segunda, há redundância de equipamento e o mesmo pode ser retirado de operação. A engenharia descobre a causa do problema e a corrige eliminando a falha e impedindo que ocorra novamente. Deste modo o equipamento deixa o período de

mortalidade infantil, à medida que os modos de falha são eliminados, entrando no, assim, no período de maturidade.

A manutenção de emergencial, uma vertente da manutenção corretiva, inclui as ações necessárias para recompor um sistema ou máquina que falhou. Normalmente implica altos custos, pois este equipamento que falhou inesperadamente pode acarretar perdas de produção, comprometimento da qualidade do produto, além de elevados custos indiretos de manutenção. A manutenção de emergência não pode ser programada e exige ações imediatas, ou porque não há redundância para a máquina quebrada ou porque não há estoque ou substituto para o item a ser produzido (LAFRAIA, 2001; SELLITTO, 2005).

A manutenção preventiva, associada à engenharia de confiabilidade, foi introduzida para prolongar a vida útil de um equipamento ou sistema, realizando intervenções em intervalos fixos para reduzir ou até mesmo evitar a possibilidade de falha. Isto pode ser efetuado por meio de inspeção, controles e serviços como: limpeza, lubrificação, calibração, detecção de defeitos (falhas incipientes), etc (DING; KAMARUDDIN, 2014; LAFRAIA, 2001). Já Higgins (2001) aponta a manutenção preventiva como uma manutenção programada com o objetivo de eliminar ou prevenir a ocorrência de uma manutenção corretiva. Indica ainda que na maioria das empresas a manutenção preventiva é limitada a lubrificação periódica, ajustes de máquinas e outras tarefas de manutenção orientadas pelo tempo, e que esses programas de manutenção, não podem ser considerados manutenção preventiva, já que as falhas continuam sendo as principais motivações para atividades de manutenção. Conforme a ABNT NBR 5462 (1994), a manutenção preventiva é a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de uma máquina ou sistema.

Para Lafraia (2001) e Ding e Kamaruddin (2014), a manutenção preditiva também visa evitar falhas e manter a condição operacional do sistema ou equipamento, mas com a utilização de tecnologia avançada, como o acompanhamento de suas condições, determinadas através de um monitoramento contínuo, indicando quando a falha é iminente. Já Higgins (2001) descreve a manutenção preditiva como uma técnica de gerenciamento que avalia regularmente a condição de operação real dos equipamentos da empresa a fim de otimizar a operação total do sistema. A manutenção preditiva apenas apresenta dados que servirão de

base para a definição das ações a serem tomadas com o objetivo de evitar que a falha ocorra, ou seja, exercer uma atividade de manutenção no tempo certo (GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2018). E conforme a norma ABNT NBR 5462 (1994) é definida como a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

Devido a essa divergência de definições quanto a qualificação das estratégias de manutenção, optou-se por seguir, nesta dissertação, a tipologia proposta pela escola nipo-americana (SELLITTO, 2005):

- a) manutenção emergencial, equipamento opera até a falha, reparando o item que falhou;
- b) manutenção corretiva, equipamento opera até a falha, reforçando ou corrigindo o item que falhou;
- c) manutenção preditiva, executa intervenções baseadas em diagnósticos; e
- d) manutenção preventiva, executa intervenções incondicionais constantes de um programa pré-agendado.

### **2.3. Manutenção centrada na confiabilidade**

Como muitas práticas de manutenção, a manutenção centrada na confiabilidade (MCC) originou-se na indústria aeronáutica. Desde então sua aplicação chegou a outros seguimentos, como as forças militares, indústria de energia nuclear, *offshore* de petróleo e gás, bem como a indústria automotiva (RAUSAND, 1998).

A MCC é a combinação de práticas de manutenção reativa, baseada no tempo ou intervalo, baseada na condição e manutenção proativa. Essas estratégias são integradas, procurando aproveitar seus respectivos pontos fortes, a fim de maximizar a confiabilidade das instalações e dos equipamentos e, ao mesmo tempo, minimizar custos. Logo, tarefas e ações de manutenção desnecessárias são evitadas, como a aplicação de uma estratégia de manutenção inadequada (RAUSAND, 1998; VISHNU; REGIKUMAR, 2016). Conforme Arno et al. (2015), a MCC concentra-se no sistema completo e está mais preocupada em manter a função geral do sistema do que seus componentes individuais. É um processo contínuo no qual as informações obtidas na

operação e as características de falha experimentadas são usadas na melhoria contínua do sistema.

Existe na indústria um pressuposto de que a realização de manutenções periódicas garante a confiabilidade e segurança dos equipamentos. Porém estudos, indicaram que este método produzia pouco ou nenhum efeito na confiabilidade ou segurança final dos equipamentos. Isso foi justificado a partir do pressuposto de que todos os equipamentos obedeciam a um mesmo mecanismo de falha, uma mesma taxa de falha, representada pela curva da banheira, apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (DE SIQUEIRA, 2005).

Deshpande e Modak (2002) apresentam alguns benefícios da MCC, tais quais: o desenvolvimento de planos de manutenção de alta qualidade; a disponibilidade de um histórico de manutenção para cada sistema, capaz de correlacionar experiências com partes especificadas, modos de falha e criticidades; a garantia de que todas as peças importantes, modos de falha e criticidades são consideradas no desenvolvimento dos planos de manutenção; a maior probabilidade do atendimento de requisitos de manutenção dos equipamentos; e uma base para a troca de informações entre as partes envolvidas.

## 2.4 Funções de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade

A aplicação da MCC requer conhecimentos teóricos sobre as funções de confiabilidade.

Confiabilidade  $R(t)$  é a probabilidade de um item ou sistema desempenhar uma função requerida até um tempo  $t$ , sob condições especificadas (ABNT NBR 5462, 1994; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Três funções auxiliares sustentam a noção de confiabilidade: a função acumulada de falhas  $F(t)$ , a função densidade de falhas  $f(t)$  e a função risco  $h(t)$ .

A função  $F(t)$  expressa a probabilidade de uma falha ocorrer até o tempo  $t$  e é representada pela equação 1.

$$F(t) = 1 - R(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt \quad (1)$$

A função  $f(t)$  representa a probabilidade de uma falha ocorrer no intervalo de tempo  $[t; t+\Delta t]$ , expressa pela equação 2.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2)$$

A função  $f(t)$  ajuda a definir  $R(t)$ , segundo a equação 3.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (3)$$

A função risco  $h(t)$  representa a quantidade de risco de falha que um equipamento corre no instante  $t$ . É expressa pela equação 4.

$$h(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4)$$

A função  $h(t)$  é a taxa instantânea de falha. A função taxa de falha  $\lambda(t)$  é a probabilidade condicional de que uma falha ocorra no intervalo  $[t, t+\Delta t]$ , dado que não houve falha até  $t$ . A taxa de falha é dada pela equação 5.

$$\lambda(t) = \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{R(t)} \quad (5)$$

Os principais modelos probabilísticos utilizados para descrever  $R(t)$  são o exponencial negativo e o modelo de Weibull a três parâmetros (equações 6 e 7) (MENGUE; SELLITO, 2013)

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (6)$$

em que  $\lambda$  = taxa de falhas constante

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^\gamma} \quad (7)$$

em que  $t_0$  = tempo isento de falhas,  $\gamma$  = fator de forma, que indica taxa de falhas decrescente ( $\gamma < 1$ ), constante ( $\gamma = 1$ ) ou crescente ( $\gamma > 1$ ), e  $\theta$  = fator de escala da distribuição, que indica o quanto a distribuição se espalha no tempo (SELLITTO, 2005).

Conforme Xie et al (2000) o modelo exponencial negativo pode ser entendido como um caso particular do modelo de Weibull, quando o fator de forma é unitário. De acordo com Menguê e Sellitto (2013), caso ambos os modelos se ajustem a um conjunto de dados, por parcimônia é preferível optar pelo modelo exponencial. O valor esperado para o tempo até uma falha é dado pelo *MTTF* (*mean time to failure*). Caso a falha seja reparável, fala-se em *MTBF* (*mean time between failures*). A equação 8 apresenta a forma geral para o *MTBF*.

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (8)$$

Para o cálculo do *MTBF*, a equação 8 pode ser resolvida por integração por partes. Como não existe uma expressão analítica para a confiabilidade sistêmica, utiliza-se a equação 9.

$$MTBF = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum R(t) \Delta t \quad (9)$$

A distribuição exponencial é a única distribuição contínua com função de risco constante. Suas representações de confiabilidade, para  $t \geq 0$  são apresentadas nas equações 10 a 13.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (10)$$

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

$$h(t) = \lambda \quad (12)$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (13)$$

A distribuição Weibull a três parâmetros é apropriada na modelagem de tempos até falha, pois apresenta funções de risco constante, estritamente crescente e estritamente decrescente. Essa distribuição é importante na modelagem de confiabilidade devido a sua flexibilidade e capacidade de representação de amostras de tempos até falha com comportamentos distintos. Suas representações de confiabilidade, para  $t \geq 0$ ,  $\gamma > 0$  e  $\theta > 0$ , são apresentadas nas equações 14 a 17.

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} e^{-t^\gamma/\theta} \quad (14)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} \quad (15)$$

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} \quad (16)$$

$$MTBF = t_0 + \theta^{\frac{1}{\gamma}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (17)$$

A função manutenibilidade (ou manutenibilidade)  $M(t)$  é análoga a  $F(t)$ .  $M(t)$  é a probabilidade que um reparo seja concluído até o tempo  $t$ . As distribuições de probabilidade mais úteis para a modelagem dos tempos até o reparo  $TTR$  são a lognormal e a normal. O valor esperado para  $M(t)$ , o  $MTTR$ , é calculado de modo análogo ao  $MTBF$ . Caso nenhuma distribuição se ajuste, uma alternativa é o uso da média aritmética dos  $TTR$  (MENGUE; SELLITO, 2013).

Fogliatto e Ribeiro (2009) ressaltam que de posse do  $MTBF$  e do  $MTTR$ , é possível calcular a disponibilidade ( $AV$ ) de um equipamento. A disponibilidade, de acordo com a ABNT NBR 5462 (1994), é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. Quanto maiores  $R(t)$  e  $M(t)$ , maior  $AV$ . Para

aumentar  $AV$ , deve-se aumentar  $MTBF$ , diminuir  $MTTR$  ou uma combinação de ambos.  $AV$  é dada pela equação 18.

$$AV = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (18)$$

Nos sistemas produtivos as máquinas podem estar dispostas de diversas formas. Os principais arranjos são máquinas em série e em paralelo. Para as máquinas dispostas em série, a primeira máquina a falhar determina a falha no sistema. Enquanto para máquinas dispostas em paralelo, a última máquina a falhar determina a falha do sistema (SELLITTO; BRUSIUS JR, 2017).

As equações 19 e 20 apresentam a confiabilidade sistêmica para os arranjos em série e paralelo, respectivamente.

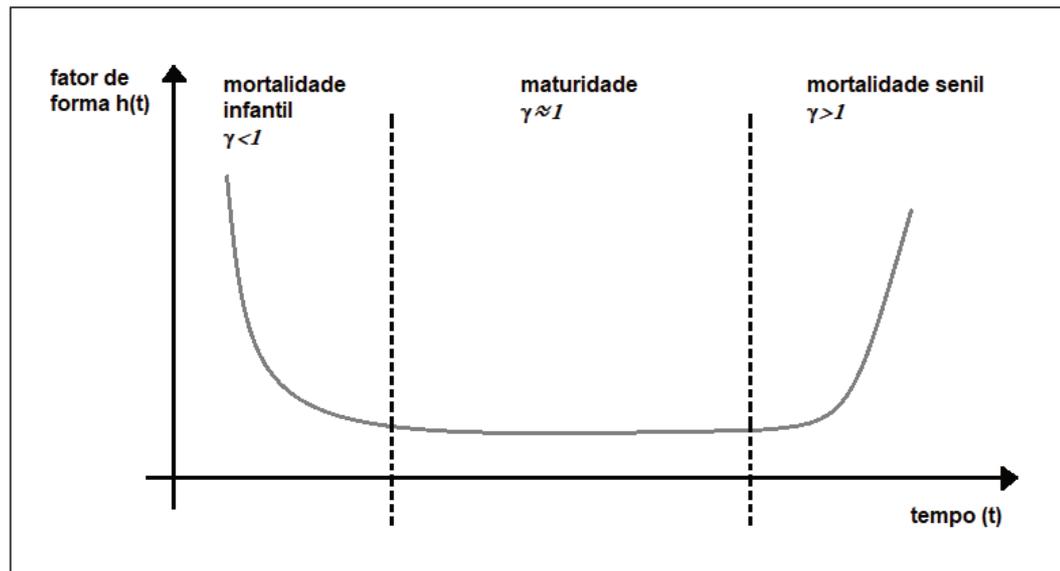
$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (19)$$

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (20)$$

em que  $R_i$  é a confiabilidade sistêmica da máquina  $i$  no instante  $t$ .

## 2.5 Curva da banheira

A curva da banheira é uma construção abstrata que expressa a expectativa de falha de um item ao longo do tempo, dado que ainda não falhou até este tempo, seu ciclo de vida. O ciclo de vida do equipamento representa o início de sua operação até o seu descarte, quando práticas de manutenção não são mais viáveis (DE SIQUEIRA, 2005; LAFRAIA, 2001). O comportamento de  $h(t)$ , associado ao fator de forma, define o ponto as fases da curva da banheira (LAFRAIA, 2001; MONTE; ALMEIDA FILHO, 2015). A Figura 4 apresenta a curva da banheira e as três fases do ciclo de vida genérico para equipamentos industriais

Figura 4 - Curva da banheira (*bath-tube curve*)

Fonte: Lafraia (2001, p. 16)

Dado que uma distribuição de Weibull possa explicar os dados de TBF de um equipamento, um tipo de fator de forma  $\gamma$  pode ser associado a cada tipo de risco e a cada fase do ciclo de vida das máquinas:  $\gamma < 1$  mortalidade infantil,  $h(t)$  decrescente;  $\gamma \approx 1$ , maturidade,  $h(t)$  constante; e  $\gamma > 1$ , mortalidade senil,  $h(t)$  crescente (BEN-DAYA et al., 2009; ROESCH, 2012).

O comportamento da função risco  $h(t)$  ou da taxa de falhas  $\lambda(t)$  informa a respeito do ponto no ciclo de vida em que se encontra o equipamento. Taxa de falhas decrescente indica que o equipamento está no período de mortalidade infantil. Neste período as falhas são atribuídas, na sua maioria, a deficiências iniciais de projeto e dos componentes, sendo sanadas na medida em que são identificadas, por uma estratégia de manutenção corretiva. Taxa de falhas constante é associada ao período de maturidade do equipamento, onde ocorrem falhas puramente aleatórias, que obedecem a um processo de Poisson homogêneo. Para este período, a melhor estratégia é a manutenção preditiva: basta monitorar o equipamento para detectar o fim da maturidade. Por fim, taxa de falhas  $h(t)$  crescente indica mortalidade senil, por desgaste dos materiais. Neste período as falhas são cada vez mais prováveis, devido à perda na resistência dos materiais. A melhor estratégia é a manutenção preventiva, pois as falhas são inevitáveis (BEN-DAYA et al., 2009; HASHEMIAN; BEAN, 2011; SELLITTO, 2005).

O Quadro 2 apresenta as relações indicadas acima, indicando os efeitos que a aplicação de cada estratégia de manutenção causa ao equipamento.

Quadro 2 - Relação entre as fases do ciclo de vida e estratégias de manutenção

<b>Fases</b>	<b>Estratégia</b>	<b>Decorrências</b>
Mortalidade infantil, falhas de origem	Emergencial	Retarda ou até impede o fim da mortalidade infantil ao não reforçar os itens que quebraram ou não remover as causas das falhas de origem
	Corretiva	Antecipa o fim da mortalidade infantil ao reforçar os itens que quebraram ou remover as causas das falhas de origem
	Preditiva	Monitora as falhas em progresso que podem resultar em quebra, mas estas são muito poucas nesta fase, pois as quebras se dão mais por baixa resistência
	Preventiva	Perpetua ou até agrava a mortalidade infantil ao trocar exatamente os sobreviventes, os itens fortes, que não têm falhas de origem
Maturidade, falhas aleatórias	Emergencial	Como se limita a trocar componentes quebrados, pode fazer retornar à mortalidade infantil se não selecionar os substitutos
	Corretiva	É inócua quanto às falhas catastróficas, mas pode reduzir o patamar de expectativa de falhas eliminando modos de falha que passaram da primeira fase
	Preditiva	Informa o início e monitora os processos de falhas progressivas que resultarão em quebras, podendo prever aumentos na probabilidade de a quebra retornar
	Preventiva	Retorna à mortalidade infantil ao trocar exatamente os sobreviventes, os itens fortes, que não têm falhas de origem e ainda não iniciaram o desgaste permite
Mortalidade senil, falhas progressivas	Emergencial	Permite que as quebras que vão ocorrer realmente ocorram a um custo interno mais baixo do que a preventiva
	Corretiva	Só será útil se for capaz de retardar ou o início da falha ou a quebra que realmente vai ocorrer
	Preditiva	Monitora os processos progressivos de falhas já iniciados prever aumentos na probabilidade da quebra
	Preventiva	Previne a emergência antecipando a troca à quebra que realmente vai ocorrer, porém a um custo interno mais alto do que a emergência

Fonte: Sellitto (2005, p. 58)

## 2.6 Análise de Modos de Falha e Efeito - FMEA

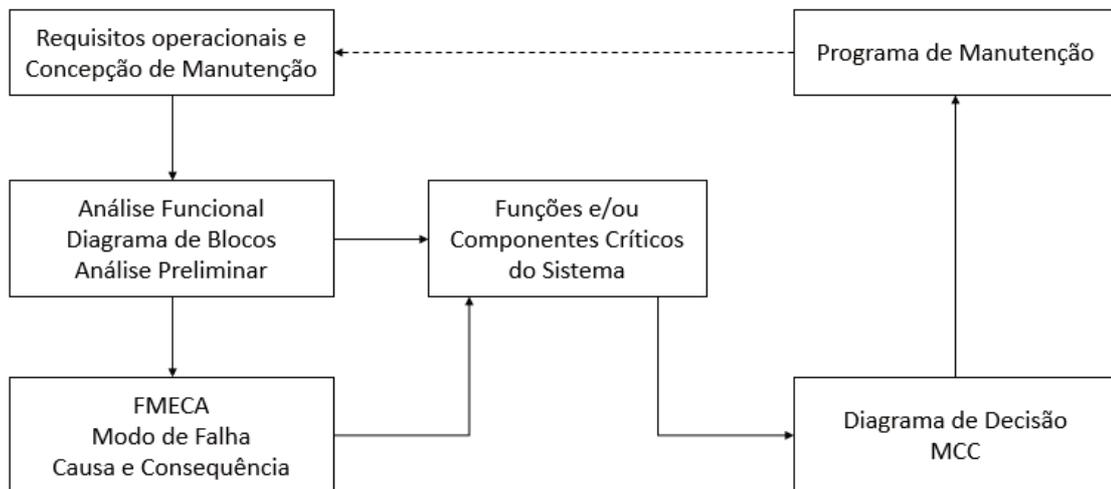
O programa de manutenção centrada na confiabilidade (MCC), do inglês *reliability centered maintenance* (RCM), reúne várias técnicas de engenharia para garantir o funcionamento adequado dos equipamentos de uma empresa. É reconhecido como um dos programas mais eficientes para se tratar as questões de manutenção, ampliando a disponibilidade de equipamentos e reduzindo custos associados a acidentes, defeitos, reparos e substituições em máquinas. (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009)

A definição de MCC, conforme Moubray (1997), é um processo usado para determinar os requisitos de manutenção de qualquer item em seu contexto operacional. Moubray ainda apresenta sete questões que devem ser contempladas pelo MCC, são elas:

- a) Quais as funções e padrões de desempenho esperados para os equipamentos da empresa?
- b) De que modo os equipamentos podem falhar em cumprir suas funções?
- c) O que causa cada falha funcional?
- d) O que acontece quando cada falha ocorre?
- e) De que forma cada falha interessa?
- f) O que pode ser feito para prevenir ou impedir cada falha?
- g) O que deve ser quando não pode ser estabelecida uma atividade proativa pertinente?

Para obtenção das respostas das questões básicas da MCC pode-se seguir as etapas propostas por Lafraia (2001) para uma análise de MCC completa, apresentadas na Figura 5. Estas etapas são detalhadas no Quadro 3.

Figura 5 - Etapas para execução do MCC



Fonte: Lafraia (2001, p. 241)

Quadro 3 - Detalhamento das etapas do MCC

Etapa	Detalhamento
Requisitos operacionais	Montar equipe de análise; Identificar dados; Coletar dados; Descrever sistema; Identificar elementos; e Definir fronteiras e interfaces.
Análise funcional	Identificar funções; Definir funções; e Definir falhas funcionais.
Elaboração de FMEA	Definir modos de falhas; Definir as causas das falhas; Definir efeitos das falhas; Classificar consequência; e Identificar sistemas críticos.
Diagrama de decisões	Aplicar diagrama de decisões; Identificar tarefas de manutenção preventiva; Selecionar tarefas efetivas; Estabelecer intervalos; e Identificar mudanças de projeto.
Programa de manutenção	Comparar atividades existentes; Detalhar instruções; Revisar planos; Conduzir auditorias; e Conduzir mudanças de projetos.

Fonte: Lafraia (2001, p. 241)

De acordo com Lafraia (2001), a MCC apresenta diversos benefícios, dentre eles: redução da carga de trabalho da manutenção preventiva, aumento da

disponibilidade dos sistemas, aumento da vida útil dos equipamentos, redução do número de peças sobressalentes, especialização de pessoal em planejamento de manutenção, rastreamento das decisões e motivação para o trabalho em equipe.

Uma das etapas da utilização da MCC (Quadro 2) é o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* – Análise de Modos de Falha e Efeito). Um método de análise de produtos ou processos usado para identificar todas as possíveis falhas e modos de falha, determinar as causas e efeitos de cada um sobre o desempenho do sistema, através de um raciocínio dedutivo, além de identificar ações que possam eliminar ou reduzir a chance de ocorrência dos modos de falha (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; MENDES; RIBEIRO, 2011).

O FMEA basicamente consiste em dois estágios. Durante o primeiro estágio, possíveis modos de falhas do produto ou processo e seus efeitos prejudiciais são identificados. Durante o segundo estágio é determinado o nível crítico (pontuação de risco) destas falhas, ordenando-as. A falha mais crítica será a primeira do ranking, e será considerada prioritária para a aplicação de ações de melhoria. Há três fatores utilizados no FMEA que auxiliam na definição de prioridades de falhas. São eles: ocorrência (O), severidade (S) e detecção (D) (BANGHART; BABSKI-REEVES; STRAWDERMAN, 2018; DE SIQUEIRA, 2005).

Para execução do FMEA é necessário a formação de uma equipe de trabalho contendo participantes com conhecimento das diversas áreas envolvidas e que possuam conhecimento técnico e habilidade para trabalhar em equipe (DE SIQUEIRA, 2005; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

### 2.6.1 Tabela FMEA

A realização do FMEA é fisicamente caracterizada pelo preenchimento da tabela FMEA. É usada para facilitar e documentar o estudo. Seus campos são descritos a seguir.

O cabeçalho é particular de cada empresa, e em geral apresenta um número de identificação do FMEA, a identificação do item/máquina que está sendo analisado, o departamento responsável por ele, os dados do coordenador da equipe e participantes e a data do documento (DE SIQUEIRA, 2005; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

A função que a máquina/item executa deve ser descrita de forma tão concisa quanto possível, a descrição correta das funções da máquina auxilia nas etapas subsequentes de identificação de falhas, uma vez que as falhas estão associadas ao não cumprimento das funções especificadas. Se houver mais de uma função, essas devem ser listadas, pois estarão associadas a diferentes modos de falha (LAFRAIA, 2001).

Os modos potenciais de falha são definidos como a maneira com que um item pode falhar em atender aos requisitos de projeto da máquina. Todos os modos de falha, pertinentes a cada item/função, devem ser listados. Já os efeitos potenciais de falha são definidos como aqueles defeitos, resultantes dos modos de falha. Em geral cada modo de falha corresponde a um efeito, porém podem haver exceções, onde um modo de falha resulta em mais de um efeito. Cada efeito listado passa por uma avaliação qualitativa, onde é definido seu valor de severidade (S), medida numa escala de 1 a 10, onde 1 significa efeito pouco severo e 10 significa efeito muito severo (BANGHART; BABSKI-REEVES; STRAWDERMAN, 2018).

As potenciais causas dos modos de falha, também, devem ser identificadas. É uma das etapas mais importantes do estudo, onde se procura identificar a causa raiz do problema. Esta etapa é, especialmente, dependente do conhecimento da equipe e as causas devem ser listadas de forma concisa e completa, a fim de facilitar os esforços de correção ou melhoria posteriormente. Ligado as causas listadas, está a ocorrência (O), relacionada a probabilidade de que as causas listadas venham a ocorrer. A avaliação da ocorrência também é feita utilizando uma escala qualitativa de 1 a 10, e relaciona-se com a taxa de falhas (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; LAFRAIA, 2001).

Os controles de prevenção e detecção são considerados atividades que podem assegurar a robustez do projeto/máquina ao modo de falha ou a causa de falha em análise. Controles atuais são aqueles que foram ou estão sendo aplicados a projetos similares. Controles usuais envolvem estudos matemáticos, estudos de laboratório, testes com protótipos, revisões formais de projeto, etc. A detecção (D) refere-se a estimativa da habilidade dos controles atuais em detectar causas ou modos potenciais de falha antes que ocorram. A avaliação da detecção também é feita utilizando uma escala qualitativa de 1 a 10, sendo 1 uma situação favorável e 10 uma situação desfavorável (BEN-DAYA et al., 2009; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Após levantados todos os pontos supracitados obtém-se um valor  $R$ , definido como risco, que é calculado para priorizar as ações de correção e melhoria do projeto/máquina. A formula para calcula do risco é uma multiplicação simples da severidade, detecção e controle, é apresentada na equação 21 (BIAN; SUN; YANG, 2015; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

$$R = S.O.D \quad (21)$$

Nota-se que o risco aumenta à medida que cresce a severidade, a probabilidade de ocorrência e a probabilidade de não detecção. O valor do risco varia entre 1 e 1000, direcionando ações de melhoria aos itens de valor de risco maior (BIAN; SUN; YANG, 2015; DE SIQUEIRA, 2005).

A partir da obtenção dos valores de risco ações são recomendadas aos itens de maior risco, junto com os responsáveis e data para execução. As ações recomendadas podem ser aplicadas para a redução da severidade do efeito ou da probabilidade de ocorrência do modo de falha, além de ações para redução da não-deteção das causas ou modos de falha (BEN-DAYA et al., 2009; DE SIQUEIRA, 2005; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Após a definição das ações recomendadas, as avaliações qualitativas devem sofrer alterações conforme a natureza de cada ação. As ações devem influenciar uma ou mais parcelas, reduzindo o risco. A redução deve ser suficiente para incluir o item na condição de risco aceitável. Se esse não for o caso, as ações devem ser reformuladas, de modo que alcancem o efeito desejado no risco (BEN-DAYA et al., 2009; DE SIQUEIRA, 2005; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

## 2.7 Definição do recurso gargalo

A aplicação de um FMEA em todas as máquinas de uma organização pode-se mostrar inviável perante a complexidade do método e o número elevado de máquinas que a empresa pode possuir. Devido a isso, procura-se identificar quais as máquinas mais importantes nos sistemas produtivos. Antunes et al. (2008) apresentam um modelo conceitual teórico para a análise macro da relação capacidade x demanda e para a determinação de gargalos reais e potenciais.

A capacidade real de um recurso é obtida pela multiplicação de sua capacidade nominal, em tempo  $t$ , pelo índice de eficiência operacional global calculado para este recurso. O índice é definido pela equação 22 (PACHECO et al., 2012).

$$\mu_g = \frac{\sum_{i=1}^n tp_i \cdot q_i}{T} \quad (22)$$

onde,  $\mu_g$  é o índice de rendimento operacional global do equipamento (IROG);  $tp$  é o tempo de processamento do produto  $x$ ;  $q$  é a quantidade de produtos  $x$  processados;  $T$  é o tempo disponível para a produção.

As demandas dos itens produzidos nas máquinas podem ser calculadas através da multiplicação das taxas de processamento unitárias (tempos de processamento, para as máquinas que produzem peça a peça) pelas quantidades obtidas a partir das informações provenientes das previsões de vendas e/ou dos pedidos efetuados pelos clientes (ANTUNES et al., 2008). Para esse trabalho, considerou-se o histórico de itens produzidos no ano de 2017.

Então, a demanda mensal deve ser comparada a capacidade real de cada máquina. Caso a demanda for maior que a capacidade, essa máquina será um recurso sem capacidade, também conhecido como gargalo, por não ter capacidade temporal de atender a demanda, se a capacidade real for maior que a demanda mensal, a máquina será um recurso com capacidade, e se a relação entre capacidade e demanda for igual ou muito próxima, a máquina será um recurso com capacidade restritiva, pois qualquer imprevisto pode resultar em falta de capacidade. A restrição (ou gargalo), é definida como qualquer coisa que limita a organização a atingir sua meta (ANTUNES et al., 2008; GOLDRATT; COX, 1997; PACHECO et al., 2012).

### 3 METODOLOGIA

Essa pesquisa trata-se de uma modelagem quantitativa e qualitativa. A pesquisa quantitativa, centrada na objetividade, considera que a realidade só pode ser compreendida com base na análise de dados brutos, recorrendo linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno, por exemplo. Já na pesquisa qualitativa, se busca explicar o porquê das coisas. A pesquisa qualitativa trabalha com o universo de significados, motivos, aspirações, crenças, valores e atitudes, o que corresponde a um espaço mais profundo das relações, dos processos e dos fenômenos que não podem ser reduzidos à operacionalização de variáveis (BERTRAND; FRANSOO, 2002; GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

Este trabalho é, também, um estudo de caso, e um estudo de caso é um estudo de natureza empírica que investiga um determinado fenômeno. É considerado uma análise aprofundada de um ou mais objetos (casos). Seu objetivo é aprofundar o conhecimento acerca de um problema não suficientemente definido, visando estimular a compreensão (MIGUEL, 2007).

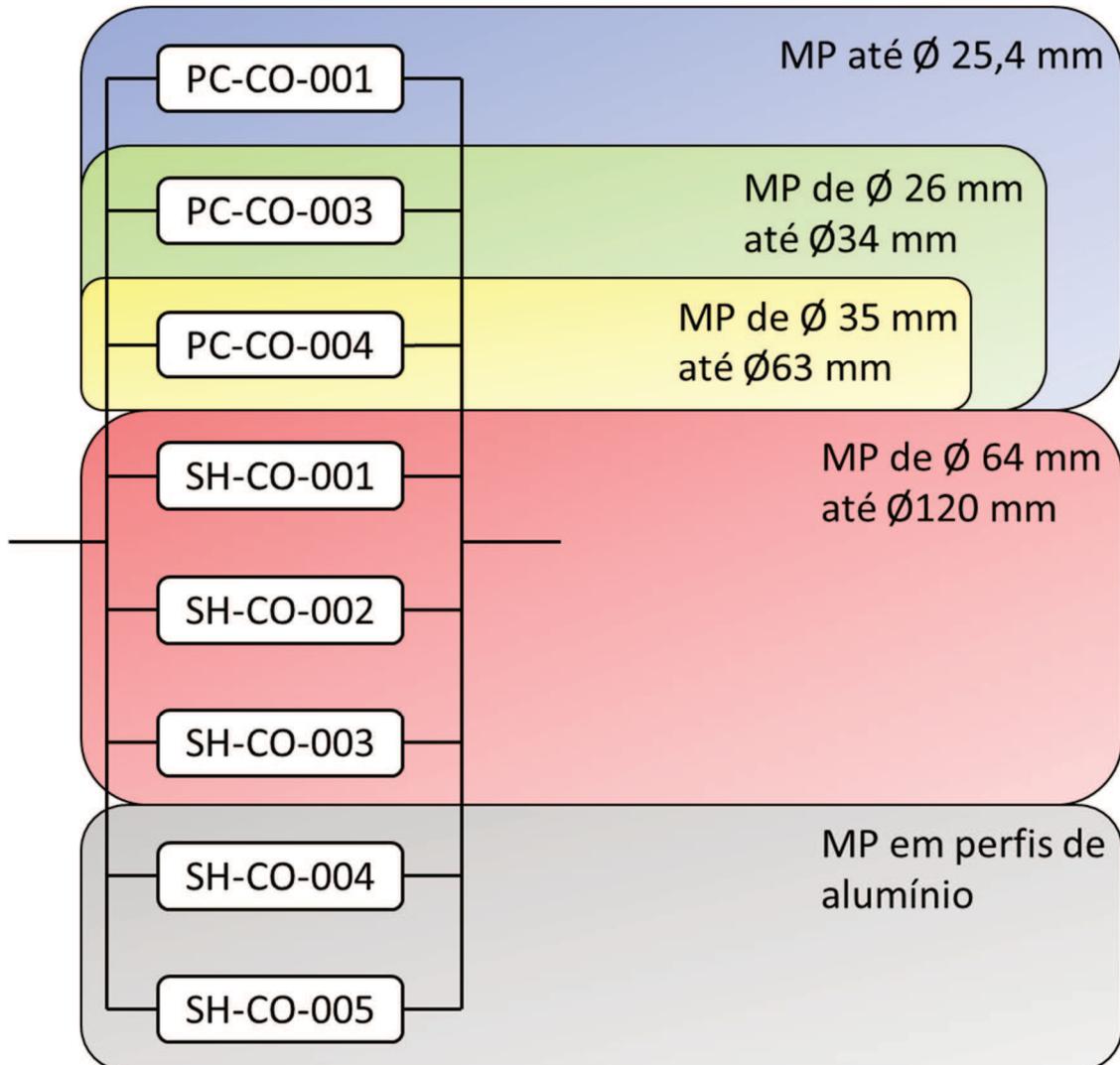
A proposta dessa dissertação é definir as estratégias de manutenção adequadas ao período do ciclo de vida, mortalidade infantil, maturidade e mortalidade senil, em que se encontram máquinas de uma planta industrial de uma forjaria. Também será utilizado a ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* - Análise do Modo e Efeito de Falhas) para a identificação e análise dos modos e causas de falhas ocorrentes na máquina gargalo da linha de forjamento. Como essa dissertação será dividida em dois artigos, cada um apresentará seu detalhamento metodológico de execução.

O objeto de pesquisa desse estudo de caso é uma empresa metalmeccânica, uma forjaria localizada na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS, fundada em 1991. Possui atualmente mais de 150 funcionários. Fornece peças de diversos tamanhos (0,1 a 45 kg), para o segmento automotivo (leve e pesado), de eletroferragens, segurança e para o segmento agrícola e de armamento.

A empresa está dividida em diversos setores, como corte de matéria prima, linhas de forjamento, tratamento térmico, zincagem e acabamento. Dessas, as áreas que serão analisadas nessa dissertação serão uma linha de forjamento, disposta em série, e o setor de corte de matéria prima, cujas máquinas estão dispostas em paralelo.

A linha de forjamento é composta por cinco máquinas em série, cada máquina é identificada por um código na empresa, e esses mesmos códigos serão utilizados neste estudo para diferenciá-las, o mesmo se aplica as máquinas do setor de corte de matéria prima (MP). A primeira máquina é um forno a indução (FI-FO-008), responsável pelo aquecimento da matéria prima, em seguida um martelo hidráulico (MH-FO-001) onde é dada a pré-forma e a forma da peça, uma prensa excêntrica (PE-FO-051) para retirar a rebarba da peça, outra prensa excêntrica (PE-FO-052) para furar a peça e, por fim, uma prensa de fricção (PF-FO-016), responsável por calibrar a peça, deixando-a na medida final de forjamento. Já o setor de corte é composto por cinco serras-fitas (SH-FO-001 a 005) e três prensas de corte (PC-CO-001, PC-CO-003 e PC-CO-004). O que as difere é a capacidade de corte, definida pelo diâmetro máximo da matéria prima (MP) que cada máquina é capaz de cortar. A capacidade de corte de cada máquina é apresentada na Figura 6. Para cortar barras de aço até  $\varnothing 25,4\text{mm}$ , pode-se utilizar qualquer uma das três prensas de corte (PC-CO-001, 003 e 004). Para cortar barras de aço de  $\varnothing 26\text{mm}$  até  $\varnothing 34\text{mm}$ , pode-se utilizar duas prensas de corte (PC-CO-003 e 004). Para cortar barras de aço de  $\varnothing 35\text{mm}$  até  $\varnothing 63\text{mm}$ , pode-se utilizar apenas uma prensa de corte (PC-CO-004). Para cortar barras de aço de  $\varnothing 64\text{mm}$  até  $\varnothing 120\text{mm}$ , pode-se utilizar três serras-fita (SH-CO-001, 002 e 003). E, para cortar perfis de alumínio pode-se utilizar duas serras-fita (SH-CO-004 e 005).

Figura 6 - Capacidade de corte das máquinas do setor de corte



Fonte: Autor (2019)

### 3.1 Método de pesquisa: modelagem quantitativa

O método de pesquisa utilizado nesse estudo de caso é modelagem quantitativa acrescida de simulação computacional. A modelagem é a utilização de técnicas matemáticas para descrever o funcionamento de um sistema produtivo ou parte dele. A simulação computacional, que complementa a modelagem quantitativa, consiste no uso de técnicas computacionais, como *softwares*, para simular a operação de sistemas produtivos, sobre um conjunto de variáveis em dado domínio, de forma a investigar a relação causal e quantitativa entre as variáveis (BERTO; NAKANO, 2000; BERTRAND; FRANSOO, 2002). Serão modelados os dados de TBF (*time between failure*), o tempo entre falhas, ou seja, o tempo em que o equipamento executou a

função pretendida entre falhas. e TTR (*time to repair*), o tempo para reparo, ou seja, o tempo necessário para consertar a falha e colocar o equipamento de volta em operação, isso para obtenção dos modelos individuais e sistêmicos para as máquinas e para a planta (ARNO et al., 2015).

Neste estudo de caso foram analisadas duas células de produção, uma linha de forjamento, cujas máquinas estão arranjadas em série, e o setor de corte de matéria prima, cujas máquinas estão arranjadas em paralelo. Para cada máquina foram coletados dados de TBF (*time between failures* – tempo entre falhas) e TTR (*time to repair* – tempo para o reparo) num período de janeiro de 2016 até maio de 2017. Os dados são obtidos a partir do *software* de gestão da manutenção da empresa. A alimentação de dados desse *software* acontece de forma manual, conforme as falhas ocorrem e são abertas ordens de serviço para que o atendimento da ocorrência. No momento que uma ordem de serviço é aberta pelo setor de produção, o *software* registra o dia e hora que a falha ocorreu para determinada máquina. Quando um manutentor atende a ocorrência, após sua conclusão, é lançado por esse, as horas que empregadas por ele para resolver o problema e restaurar as funções da máquina, contabilizando assim o dia e hora que máquina voltou a produzir. Conforme Sellitto (2005) dados coletados da operação e reparo de uma máquina em um ambiente, como tempo entre falhas e o tempo para o reparo, são variáveis aleatórias. Essas variáveis são consequências de outras variáveis aleatórias, entre elas o tempo alocado para operação, a resistência dos materiais e a carga exigida na atividade. Nesse caso, são utilizadas técnicas probabilísticas para se prever o comportamento dessas variáveis.

O método de trabalho utilizado foi seguinte: (i) Obtenção dos dados do sistema de gestão da manutenção; (ii) modelagem e cálculo de MTBF, MTTR e AV; (iii) definição da estratégia de manutenção para cada máquina; e (iv) conclusões. Para que se obtivesse valores mais próximos a realidade foram descartadas as ocorrências por falha humana e as interrupções sem perda de produção, tais como falhas em ventiladores e bombas de desmoldante, muito comuns, mas que ocorrem em equipamentos anexos a máquina, não afetando sua vida útil.

Para a modelagem dos dados foram utilizados os *softwares ProConf*, para modelagem das máquinas e *ProSis* para modelagem dos sistemas, série e paralelo. Esses *softwares* testam ajustes e fornecem estimativas de parâmetros, intervalos de confiança e valores esperados para distribuições de probabilidade, além das funções

relacionadas à análise de confiabilidade (FRITSCH, 1998). Dos modelos de probabilidade ajustados pelo software, utilizou-se o Exponencial e Weibull, para os dados de TBF, e Lognormal e Normal, para os dados TTR (HOKSTAD, 1997; MANZINI et al., 2015; XIE; KONG; GOH, 2000). As distribuições são ajustadas por estimativa de máxima verossimilhança (*MLE*), executando os testes Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov (MONTGOMERY; RUNGER, 2010).

### **3.2 Método de pesquisa: modelagem qualitativa**

Esta etapa da pesquisa, pode ser definida como exploratória, pois avaliou a aplicação do FMEA em duas máquinas de uma empresa do setor metalmeccânico. Conforme Gerhardt e Silveira (2009), a pesquisa exploratória tem como finalidade familiarizar o pesquisador com o problema, com vista a torna-lo mais explícito, facilitando a construção de hipótese e aprimorar pensamentos.

Para essa etapa do estudo de caso foram analisadas duas máquinas da linha de forjamento da empresa. A definição das máquinas analisadas se deu através da análise do gargalo da linha e por indicação da empresa, uma máquina que não possui *backup*. Então foi aplicada a metodologia FMEA conforme descrito a seguir.

Em um primeiro momento formou-se a equipe para a realização do FMEA composta por 5 pessoas: o engenheiro de processos e melhorias da empresa, com mais de 10 anos de experiência na área, o técnico eletrônico, com mais de 30 anos de experiência, o líder de manutenção elétrica, com mais de 30 anos de experiência, um consultor de gestão da qualidade, com mais de 50 anos de experiência, além do autor deste trabalho. Em seguida foram identificados os itens de cada máquina a serem analisados e definidas suas funções.

A lista de modos potenciais de falha é construída com base na experiência da equipe, a partir da interação entre os participantes conduzida em um ambiente de *brainstorming*, onde todos se manifestam. Nessa etapa utilizam-se também o histórico de manutenção das máquinas, assim como dados de assistência técnica e manuais (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Então são definidos, pela equipe, os efeitos de cada modo de falha. Avaliando-os, em seguida, conforme sua severidade, a partir do Quadro 4. Para a avaliação de severidade, ocorrência e detecção, a equipe utilizou as tabelas dos manuais do IQA (Instituto da Qualidade Automotiva), disponibilizado pela empresa.

Quadro 4 - Critérios sugeridos de avaliação de severidade

<b>Classificação</b>	<b>Efeito</b>	<b>Severidade do efeito no processo</b>
10	Falha em atender a requisitos de segurança e/ou regulatórios	Pode trazer perigo ao operador (de máquina ou montagem), sem prévio aviso
9		Pode trazer perigo ao operador (de máquina ou montagem), com prévio aviso
8	Interrupção maior	100% dos produtos podem ser refugados. Parada da linha de produção ou parada de embarque (expedição)
7	Interrupção significativa	Uma parcela do lote de produção pode ser refugada. Desvio do processo primário, incluindo velocidade reduzida da linha de produção e acréscimo da mão de obra
6	Interrupção moderada	100% do lote de produção pode ser retrabalhado fora da linha e aceito
5		Uma parcela do lote de produção pode ser retrabalhada fora da linha e aceita
4	Interrupção moderada	100% do lote de produção pode ser retrabalhado na estação, antes de ser processado
3		Uma parcela do lote de produção pode ser retrabalhada na estação, antes de ser processada
2	Interrupção menor	Ligeira inconveniência para o processo, operação ou operador
1	Nenhum efeito	Nenhum efeito perceptível

Fonte: IQA (2008, p. 88)

A próxima etapa refere-se à identificação das causas relacionadas as falhas identificadas. Nesse caso Fogliatto e Ribeiro (2009) indicam que dois aspectos contribuem para um bom resultado nessa etapa: (i) o trabalho em equipe, que permite a soma dos conhecimentos, e (ii) o trabalho sistemático, que contribui para garantir que todos os elementos serão considerados. A partir da identificação das causas, essas são classificadas, quanto a sua ocorrência, conforme os critérios sugeridos no Quadro 5.

Quadro 5 - Critérios sugeridos de avaliação de ocorrências

Probabilidade de Falha	Incidentes por itens	Classificação
Muito alta	$\geq 100$ por mil $\geq 1$ em 10	10
Alta	50 por mil 1 em 20	9
	20 por mil 1 em 50	8
	10 por mil 1 em 100	7
Moderada	2 por mil 1 em 500	6
	0,5 por mil 1 em 2.000	5
	0,1 por mil 1 em 10.000	4
Baixa	0,01 por mil 1 em 100.000	3
	$\leq 0,001$ por mil 1 em 1.000.000	2
Muito baixa	A falha é eliminada através de controle preventivo	1

Fonte: IQA (2008, p. 93)

Em seguida a equipe lista as atividades de validação, verificação ou prevenção que são aplicadas, os controles de prevenção e detecção. Em seguida é avaliada a habilidade de detecção desses controles, a pontuação é definida a partir da classificação sugerida no Quadro 6.

Quadro 6 - Critérios sugeridos de avaliação de detecção

Oportunidade para detecção	Probabilidade de detecção por controle de processo	Classificação	Probabilidade de detecção
Nenhuma oportunidade de detecção	Nenhum controle de processo. Não se pode detectar, ou não está analisado	10	Praticamente impossível
Improvável detectar em qualquer estágio	Modo de falha e/ou erro (causa) não é facilmente detectável	9	Muito remota
Detecção do problema pós-processamento	Detecção do modo de falha pós processamento, pelo operador, através de meios visuais/táteis/audíveis	8	Remota
Detecção do problema na origem	Detecção do modo de falha, na estação, pelo operador, através de meios visuais/táteis/audíveis, ou pós-processamento, através do uso de medição por atributo (passa/não-passa, verificação de torque manualmente/por chave de estalo, etc.)	7	Muito baixa
Detecção do problema pós-processamento	Detecção do modo de falha, pós-processamento, pelo operador, através do uso de medição por variável, ou na estação, pelo operador, através do uso de medição por atributo (passa/não-passa, verificação de torque manualmente/por chave de estalo, etc.)	6	Baixa
Detecção do problema na origem	Detecção do modo de falha ou erro (causa) na estação, pelo operador, através do uso de medição por variável, ou por controles automáticos na estação, que detectarão peças discrepantes e notificarão o operador (luz, campainha, etc.). Medição realizada no <i>setup</i> e verificação da primeira peça (somente para causas de <i>setup</i> )	5	Moderada
Detecção do problema pós-processamento	Detecção do modo de falha pós-processamento, por controles automáticos, que detectarão peças discrepantes e travarão a peça, para impedir processamento subsequente	4	Moderadamente alta

Detecção do problema na origem	Detecção do modo de falha na estação, por controles automáticos, que detectarão peças discrepantes e travarão a peça, para impedir processamento subsequente	3	Alta
Detecção do erro e/ou prevenção do problema	Detecção de erro (causa), na estação, por controles automáticos, que detectarão o erro e impedirão que a peça discrepante seja produzida	2	Muito alta
Detecção não aplicável. Prevenção do erro	Prevenção do erro (causa) como resultado do projeto do dispositivo de fixação, projeto da máquina, ou projeto de peça. Peças discrepantes não podem ser produzidas porque o item foi tornado à prova de erro, pelo projeto do processo/produto	1	Praticamente certa

Fonte: IQA (2008, p. 93)

Por fim, de posse dos valores de avaliação de severidade, ocorrência e detecção, é calculado o valor do risco para cada um dos modos de falha, utilizando a equação 21. A partir desses valores foram definidas as ações e de correção e melhoria. A equipe definiu valores de risco a partir de 150 para propor ações de correção e melhoria aos itens. Fogliatto e Ribeiro (2009), destacam que podem surgir valores de risco iguais para diferentes itens, logo deve-se priorizar os itens cujo valor de severidade for mais alto.

Após definidas as ações de correção e melhoria, com seus respectivos responsáveis e datas, o risco deve ser recalculado para verificar se as ações sugeridas terão influência sobre o risco, realmente, se não, devem ser reformuladas.

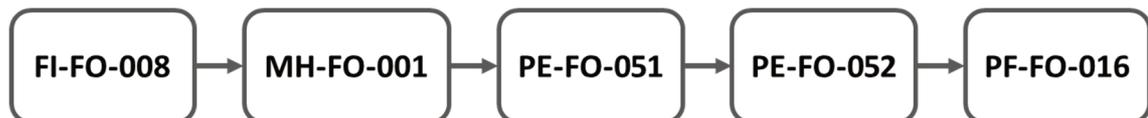
O método de trabalho utilizado foi seguinte: (i) Identificação dos itens produzidos e medição dos tempos de processamento em cada máquina; (ii) obtenção das demandas mensais de produção por máquina; (iii) cálculo do índice de rendimento operacional global de cada máquina por mês; (iv) obtenção das capacidades nominais e reais das máquinas em cada mês; (v) identificação das máquinas gargalo do processo produtivo de forjamento; e (vi) aplicação da ferramenta FMEA. Para esse trabalho, utilizou-se na definição do gargalo da linha de forjamento, o histórico de produção da linha no ano de 2017.

## 4 MODELAGEM QUANTITATIVA

Este capítulo apresentará os resultados das análises realizadas para cada máquina e sistema produtivo formado. Serão apresentados para cada máquina: os dados coletados, os ajustes de distribuições, papel de probabilidade, modelo de máxima verossimilhança obtido, taxa de falhas e função de confiabilidade. Para os sistemas produtivos: a curva de confiabilidade do sistema, o tempo médio entre falhas e a sua disponibilidade.

A Figura 7 apresenta o diagrama em blocos da linha de forjamento, que é arranjada em série. O setor de corte de matéria prima é arranjado em paralelo, porém as máquinas variam conforme o diâmetro do item a ser produzido. Para itens cuja matéria prima é de diâmetro até 25,4mm, as máquinas PC-CO-001, 003 e 004 podem ser utilizadas em paralelo; para itens cuja matéria prima é de diâmetro de 26mm até 34mm, as máquinas PC-CO-003 e 004 podem ser utilizadas em paralelo; para itens cuja matéria prima é de diâmetro de 35mm até 63mm, só é possível utilizar uma máquina, a PC-CO-004; para itens cuja matéria prima é de diâmetro de 64mm até 120mm, as máquinas SH-CO-001, 002 e 003 podem ser utilizadas em paralelo; para itens cuja matéria prima é um perfil, as máquinas SH-CO-004 e 005 podem ser utilizadas em paralelo.

Figura 7 - Diagrama de blocos da linha



Fonte: Autor (2019)

### 4.1 Forjamento - primeira máquina: FI-FO-008

As Tabela 3 e Tabela 4 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 3 - TBF de FI-FO-008

TBF FI-FO-008							
0,98	18	108	4,02	18	54	9	90
1,47	18	126	4,07	18	81	27	144
7,27	27	153	4,38	27	108	27	387
11,51	27	198	9	27	153	36	675
18	90	792	18	45	351	36	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4 - TTR de FI-FO-008

TTR FI-FO-008									
0,82	0,45	0,98	2,13	5,30	4,03	1,33	2,27	1,32	
0,40	2,35	0,78	9,58	1,82	0,68	8,53	0,45	0,77	
2,53	1,38	1,12	0,47	0,88	0,48	0,53	1,63	0,57	
7,40	1,55	1,13	1,78	0,85	1,13	0,30	0,53	1,68	
0,38	1,48	2,38	2,75	0,55	0,42	0,75	0,43	0,53	

Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de TBF. O modelo Weibull não foi rejeitado pelo *ProConf*, então foi definido para essa análise. Para os dados de TTR, os modelos, normal e lognormal, não foram ajustados, usou-se então a média aritmética.

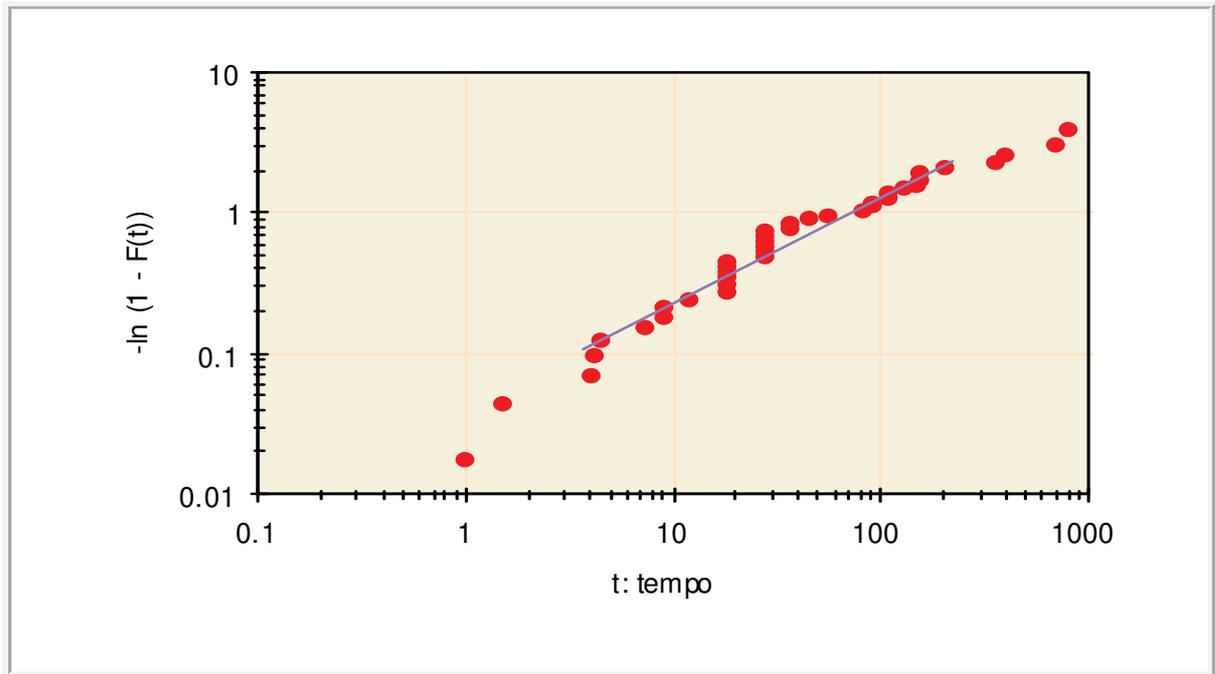
Tabela 5 - Ajustes da distribuição da amostra do FI-FO-008

Teste	Teste Qui-quadrado	Nível de significância	Teste KS	Nível de significância	Rejeitada
Exponencial	41,42	0,0001	0,3044	0,0001	Sim
Weibull	3,67	0,453	0,1338	0,076	Não

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 8 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Graficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis e confirmam a escolha.

Figura 8 - Papel de probabilidade de Weibull da amostra do FI-FO-008



Fonte: *Proconf* (2019)

O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 6 e as análises gráficas referente a amostra são apresentadas na sequência.

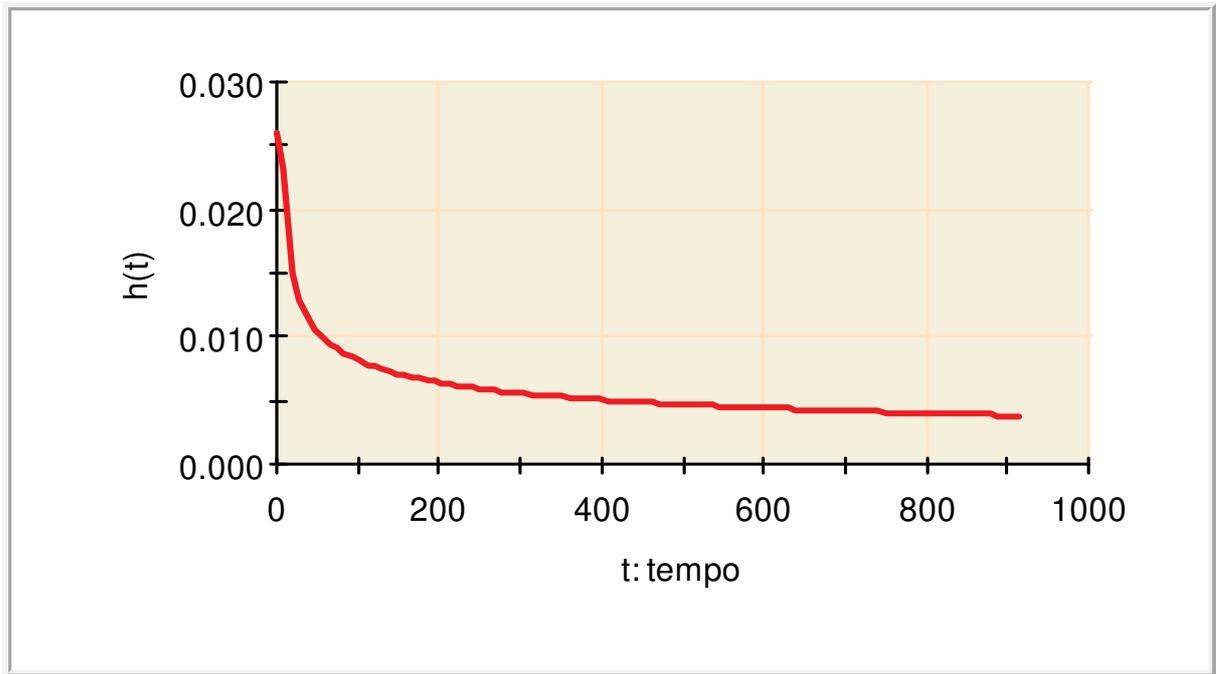
Tabela 6 - Modelo de máxima verossimilhança para FI-FO-008

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor modelado</b>
Modelo de distribuição TBF	Weibull
Modelo de distribuição TTR	Média aritmética
Fator de localização $t_0$	0
Fator de forma $\gamma$ mais provável	0,6835
Intervalo de confiança para o fator de forma	0,482 até 0,805
Fator de escala $\theta$ mais provável	74,88 horas
Intervalo de confiança para o fator de escala	42,20 até 121,53
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	45,3 %
Nível de significância pelo teste $K-S$	7,6 %
<i>MTBF</i>	98,25 horas
<i>MTTR</i>	1,77 horas
<i>AV</i>	98,23%
<i>R(t)</i>	$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{74,88}\right)^{0,66}}$

Fonte: Autor (2017)

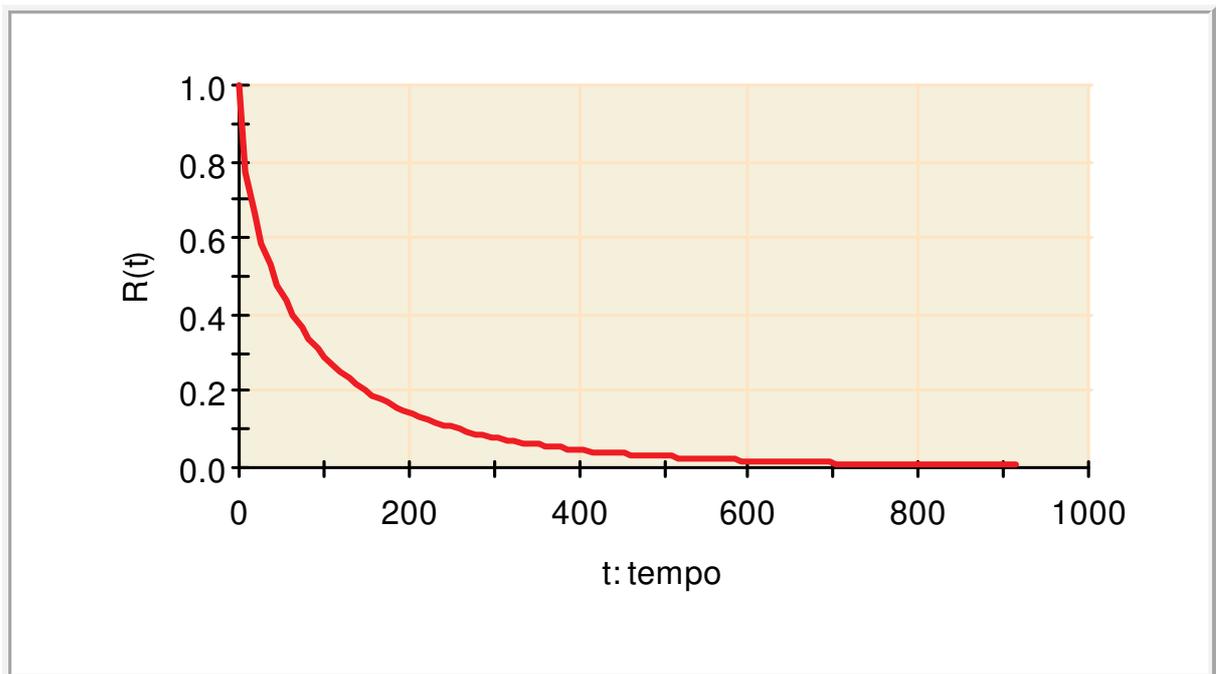
A taxa de falhas (Figura 9) obtida na análise se mostrou decrescente, comportamento característico de um equipamento em fase de mortalidade infantil.

Figura 9 - Taxa de falhas FI-FO-008

Fonte: *Proconf* (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 10) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 10 - Função de confiabilidade FI-FO-008

Fonte: *Proconf* (2019)

## 4.2 Forjamento - segunda máquina: MH-FO-001

As Tabela 7 e Tabela 8 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 7 - *TBF* de MH-FO-001

<b>TBF MH-FO-001</b>											
0,5	18	72	3,43	9	36	0,92	27	45	54	27	
5,98	27	90	5,63	9	45	1,98	27	99	72	27	
8,1	36	117	9	11,8	54	4,25	27	99	81	27	
9	54	126	9	18	81	4,9	36	108	99	36	
9	72	549	9	27	108	9	36	387	99	45	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 8 - *TTR* de MH-FO-001

<b>TTR MH-FO-001</b>												
1,35	0,32	0,85	1,08	1,15	2,53	0,68	0,12	16,17	0,17	0,43	3,40	1,32
0,13	2,83	0,68	0,73	0,95	0,38	15,33	1,63	0,47	0,92	3,87	0,75	4,25
0,23	6,03	0,58	0,35	0,40	1,23	1,00	1,25	6,75	0,82	3,02	3,28	0,58
0,73	0,30	1,38	0,68	0,87	0,87	8,33	5,17	0,38	2,33	1,27	0,62	3,83
0,30	1,23	0,58	1,10	0,63	12,32	1,12	0,18	0,05	1,27	1,22	2,78	4,25
0,55	0,77	1,55	2,47	2,48	1,00	0,87	5,20	0,58	0,35	0,20	3,72	
2,12	0,87	0,35	1,68	2,18	2,98	0,82	0,83	1,08	0,60	0,48	6,53	

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 9 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de *TBF*. O modelo Weibull não foi rejeitado pelo *ProConf*, então foi definido para essa análise. Para os dados de *TTR*, foi ajustado o modelo lognormal.

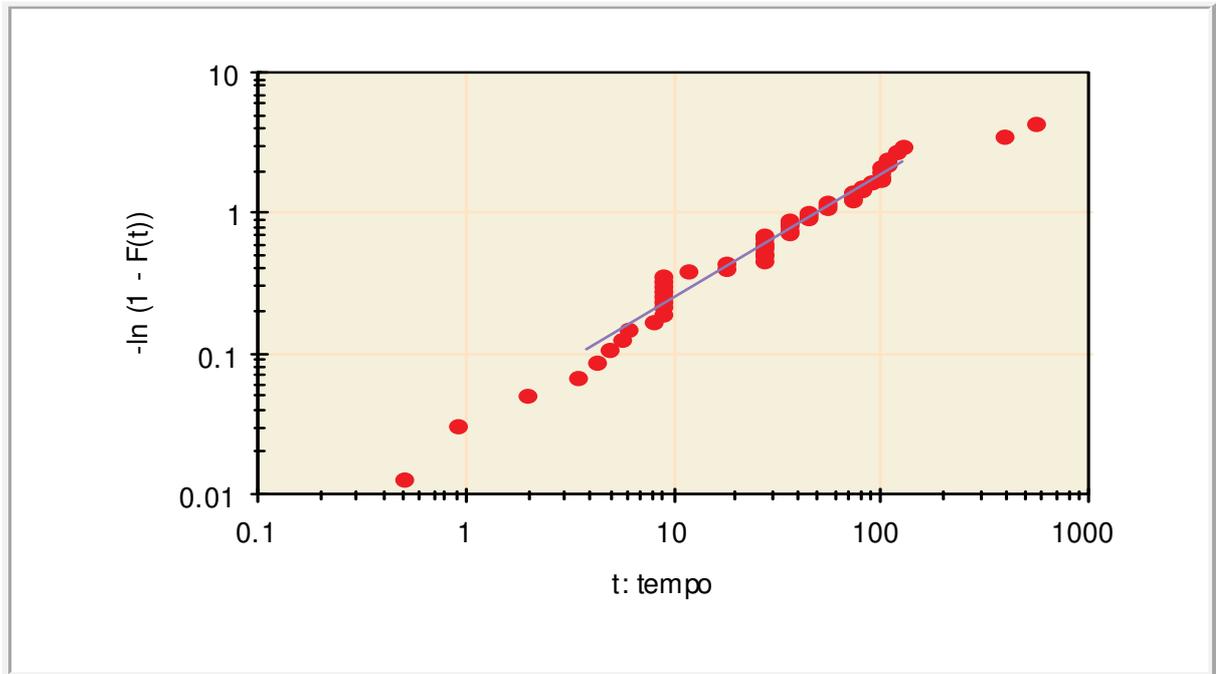
Tabela 9 - Ajustes da distribuição da amostra do MH-FO-001

<b>Teste</b>	<b>Teste Qui-quadrado</b>	<b>Nível de significância</b>	<b>Teste KS</b>	<b>Nível de significância</b>	<b>Rejeitada</b>
Exponencial	152,22	0,0001	0,1618	0,001	Sim
Weibull	16,95	0,0046	0,1003	0,1729	Não

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 11 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Gráficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis e confirmam a escolha.

Figura 11 - Papel de probabilidade de Weibull da amostra do MH-FO-001



Fonte: Proconf (2019)

O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 10 e as análises referente a amostra são apresentadas na sequência.

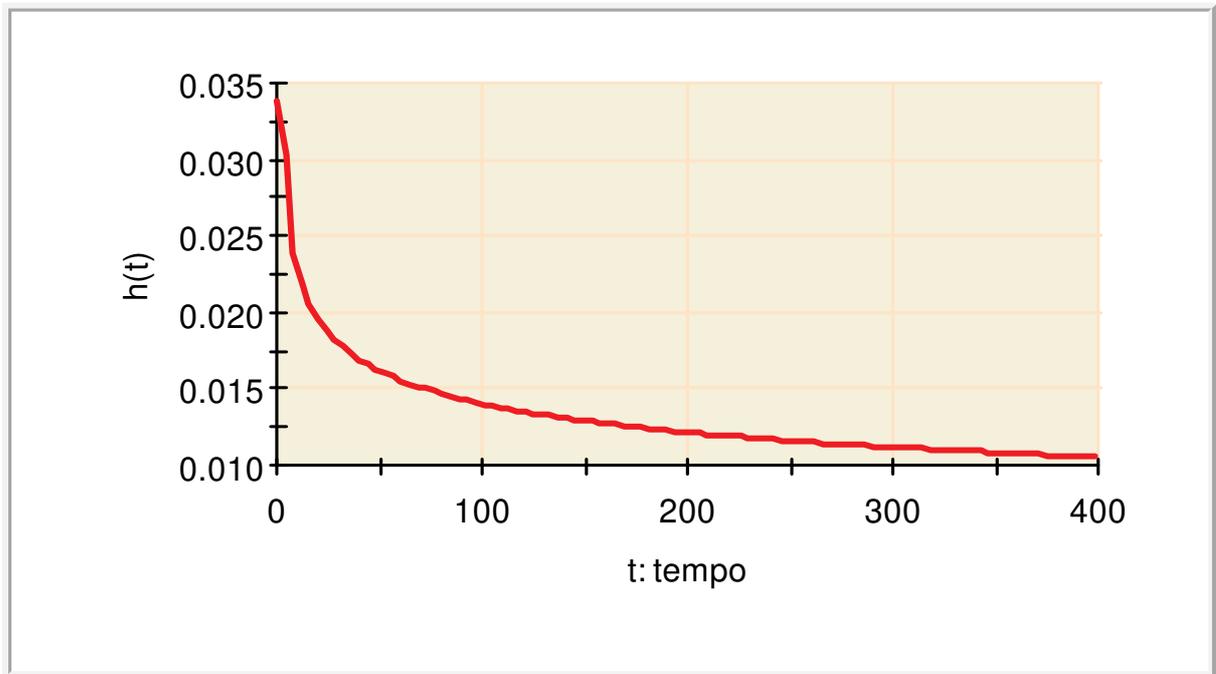
Tabela 10 - Modelo de máxima verossimilhança para MH-FO-001

Parâmetro	Valor modelado
Modelo de distribuição TBF	Weibull
Modelo de distribuição TTR	Lognormal
Fator de localização $t_0$	0
Fator de forma mais provável	0,8145
Intervalo de confiança para o fator de forma	0,615 até 0,943
Fator de escala mais provável	49,64 horas
Intervalo de confiança para o fator de escala	33,74 até 69,63
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	0,46%
Nível de significância pelo teste K-S	17,29%
MTBF	55,72 horas
MTTR	2,01 horas
AV	96,52%
$R(t)$	$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{49,64}\right)^{0,82}}$

Fonte: Autor (2019)

A taxa de falhas (Figura 12) obtida na análise se mostrou decrescente, comportamento característico de um equipamento em fase de mortalidade infantil.

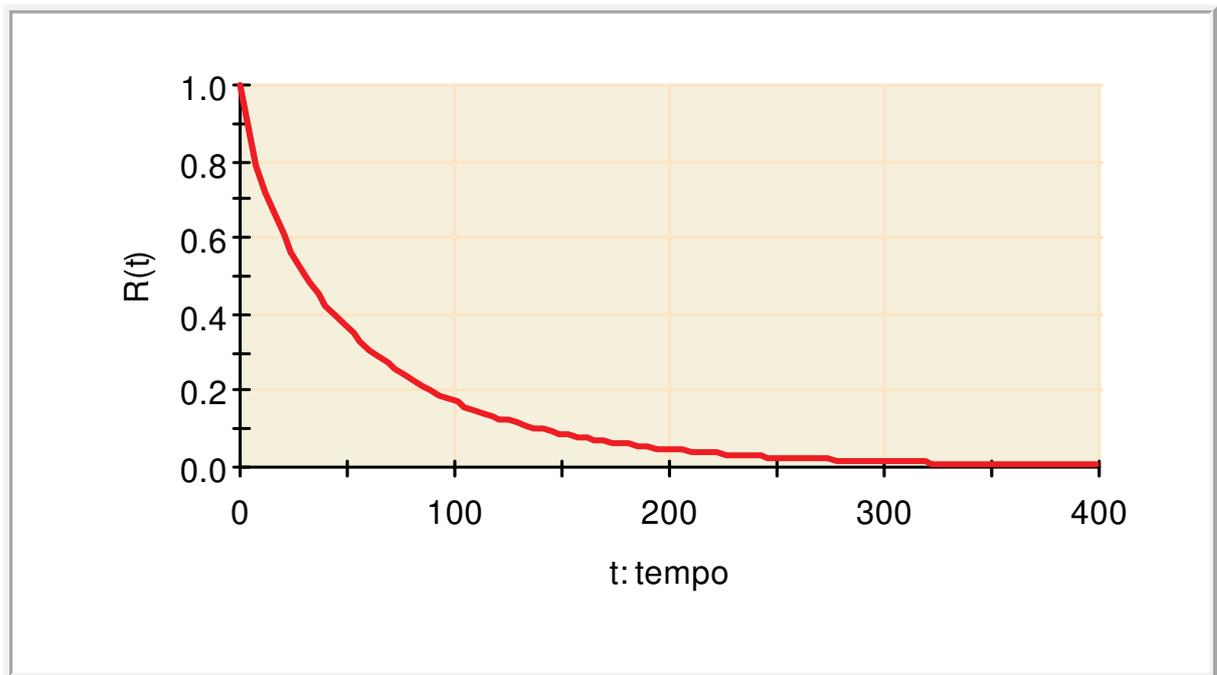
Figura 12 - Taxa de falhas MH-FO-001



Fonte: *ProConf* (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 13) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 13 - Função de confiabilidade MH-FO-001



Fonte: *ProConf* (2019)

### 4.3 Forjamento - terceira máquina: PE-FO-051

A Tabela 11 e Tabela 12 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 11 - *TBF* de PE-FO-051

TBF PE-FO-051						
8,7	18	21,27	54	72	441	2079
9	18	45	54	198	1206	

Fonte: Autor (2019)

Tabela 12 - *TTR* de PE-FO-051

TTR PE-FO-051						
2,22	0,40	0,40	1,12	0,88	0,15	2,78
0,52	0,57	0,23	0,35	0,38	0,92	

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 13 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de *TBF*. O modelo Weibull não foi rejeitado pelo *ProConf*, então foi definido para essa análise. Para os dados de *TTR*, foi ajustado o modelo lognormal.

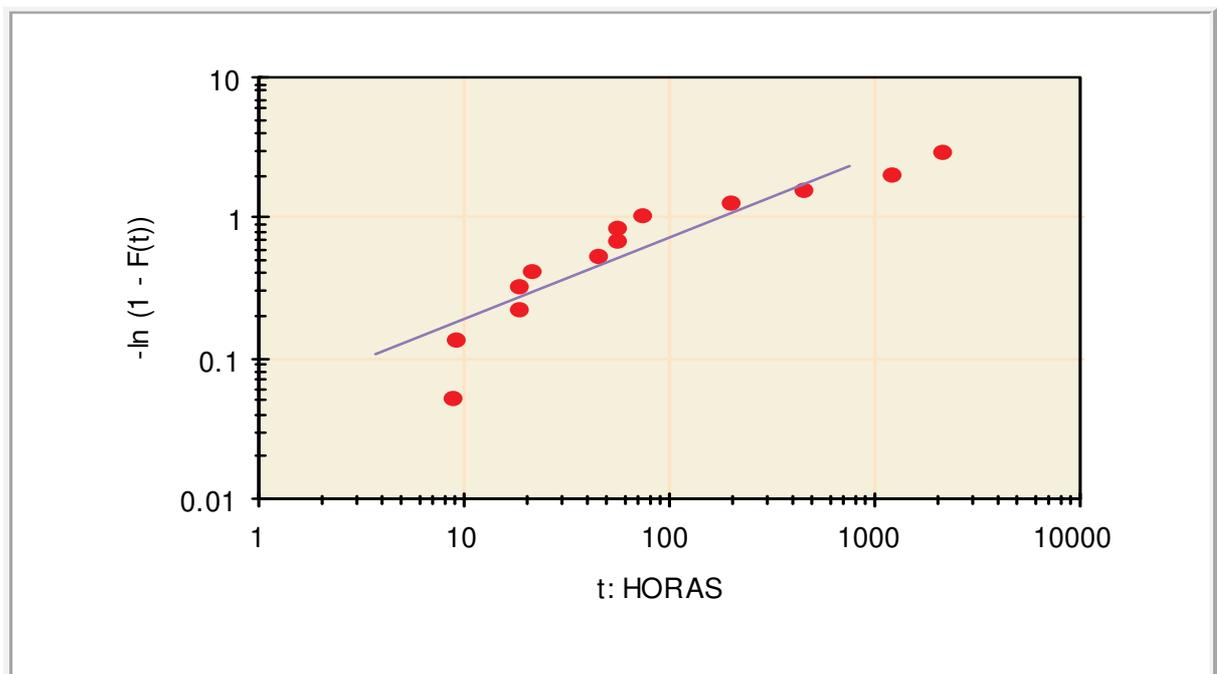
Tabela 13 - Ajustes da distribuição da amostra da PE-FO-051

Teste	Teste Qui-quadrado	Nível de significância	Teste KS	Nível de significância	Rejeitada
Exponencial	13,02	0,0015	0,4935	0,0001	Sim
Weibull	2,26	0,1328	0,2114	0,1162	Não

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 14 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Graficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis, neste caso os pontos são mais dispersos devido ao tamanho menor da amostra.

Figura 14 - Papel de probabilidade de Weibull da amostra da PE-FO-051



Fonte: ProConf (2019)

O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 14 e as análises referente a amostra são apresentadas na sequência.

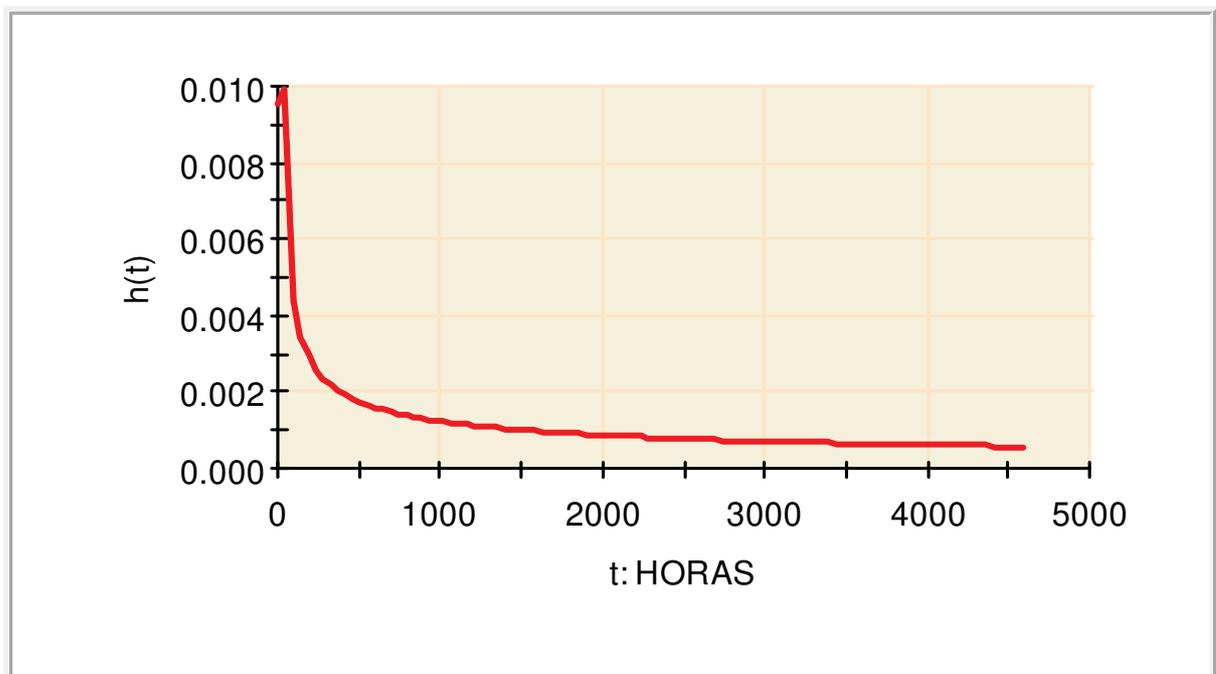
Tabela 14 - Modelo de máxima verossimilhança para PE-FO-051

Parâmetro	Valor modelado
Modelo de distribuição TBF	Weibull
Modelo de distribuição TTR	Lognormal
Fator de localização $t_0$	0
Fator de forma mais provável	0,5555
Intervalo de confiança para o fator de forma	0,273 até 0,685
Fator de escala mais provável	174,92 horas
Intervalo de confiança para o fator de escala	32,66 até 553,74
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	13,28%
Nível de significância pelo teste K-S	11,62%
MTBF	322,79 horas
MTTR	0,83 horas
AV	99,74%
$R(t)$	$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{174,92}\right)^{0,56}}$

Fonte: Autor (2019)

A taxa de falhas (Figura 15) obtida na análise se mostrou decrescente, comportamento característico de um equipamento em fase de mortalidade infantil.

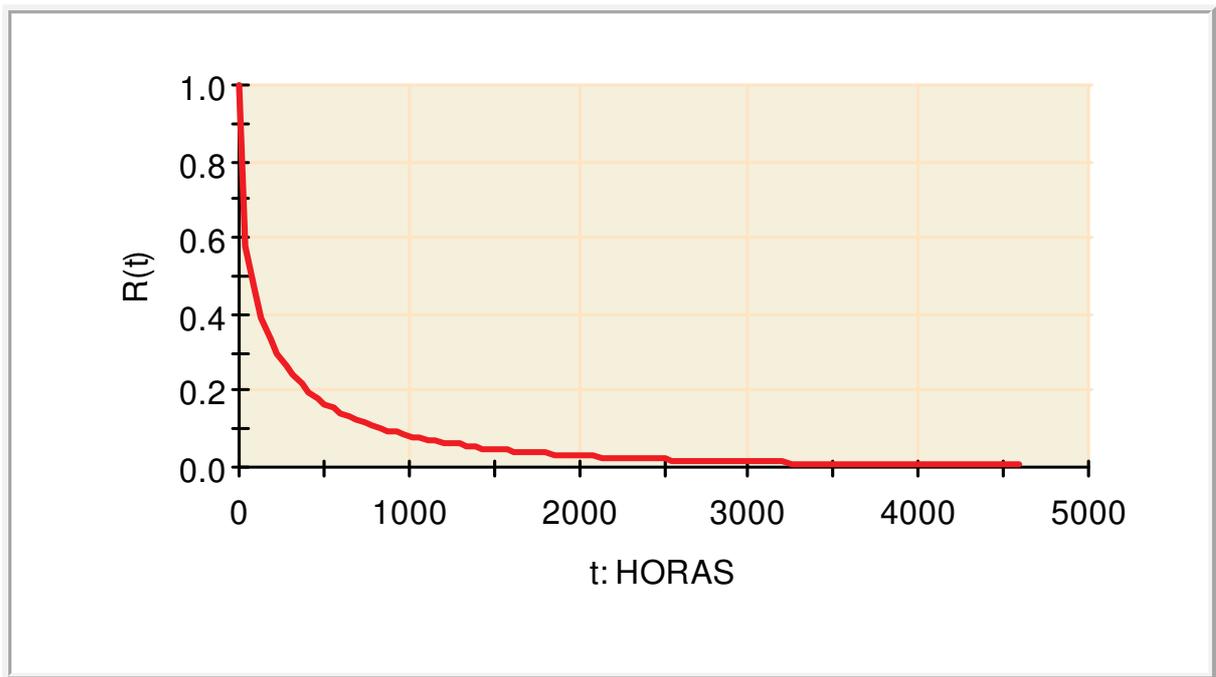
Figura 15 - Taxa de falhas PE-FO-051



Fonte: ProConf (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 16) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 16 - Função de confiabilidade PE-FO-051



Fonte: *ProConf* (2019)

#### 4.4 Forjamento - quarta máquina: PE-FO-052

A Tabela 15 e Tabela 16 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 15 - *TBF* de PE-FO-052

TBF PE-FO-052			
45	531	288	81
54	1413	1566	

Fonte: Autor (2019)

Tabela 16 - *TTR* de PE-FO-052

TTR PE-FO-052			
9,95	1,68	0,82	0,98
0,70	1,02	1,38	

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 17 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de *TBF*. Os modelos Weibull e exponencial não foram rejeitados pelo *ProConf*. Por parcimônia, escolheu-se o modelo

exponencial. Para os dados de *TTR*, os modelos, normal e lognormal não foram ajustados, usou-se então a média aritmética.

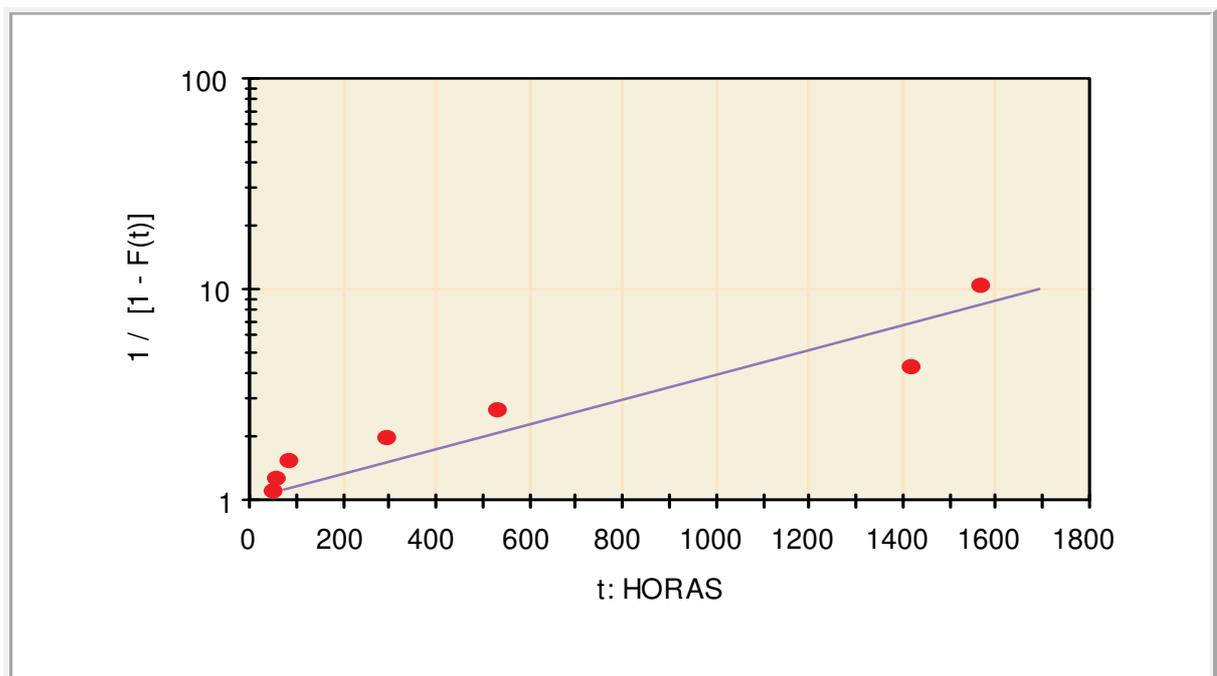
Tabela 17 - Ajustes da distribuição da amostra da PE-FO-052

Teste	Teste Qui-quadrado	Nível de significância	Teste KS	Nível de significância	Rejeitada
Exponencial	2,70	0,1004	0,2957	0,0645	Não
Weibull	1,50	0,2208	0,2039	0,2557	Não

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 17 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Gráficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis, neste caso os pontos são mais dispersos devido ao tamanho menor da amostra.

Figura 17 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da PE-FO-052



Fonte: *ProConf* (2019)

O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 18 e as análises referente a amostra são apresentadas na sequência.

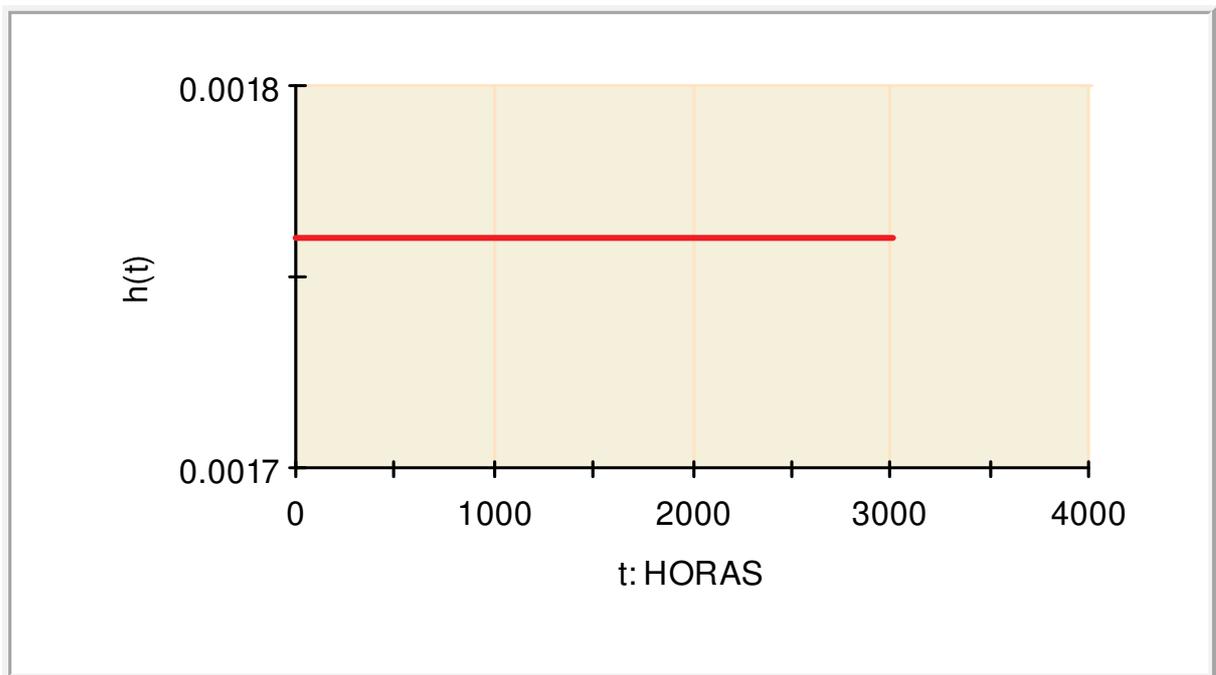
Tabela 18 - Modelo de máxima verossimilhança para PE-FO-052

Parâmetro	Valor modelado
Modelo de distribuição TBF	Exponencial
Modelo de distribuição TTR	Média aritmética
Fator de localização $t_0$	0
Taxa de falhas (falhas por hora)	0,0018
Intervalo de confiança para a taxa de falhas	0,0007 até 0,0033
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	10,04%
Nível de significância pelo teste $K-S$	6,45 %
$MTBF$	568,28 horas
$MTTR$	2,36 horas
$AV$	99,58%
$R(t)$	$R(t) = e^{-(0,0018t)}$

Fonte: Autor (2019)

A taxa de falhas (Figura 18) obtida na análise se mostrou constante, comportamento característico de um equipamento em fase de maturidade.

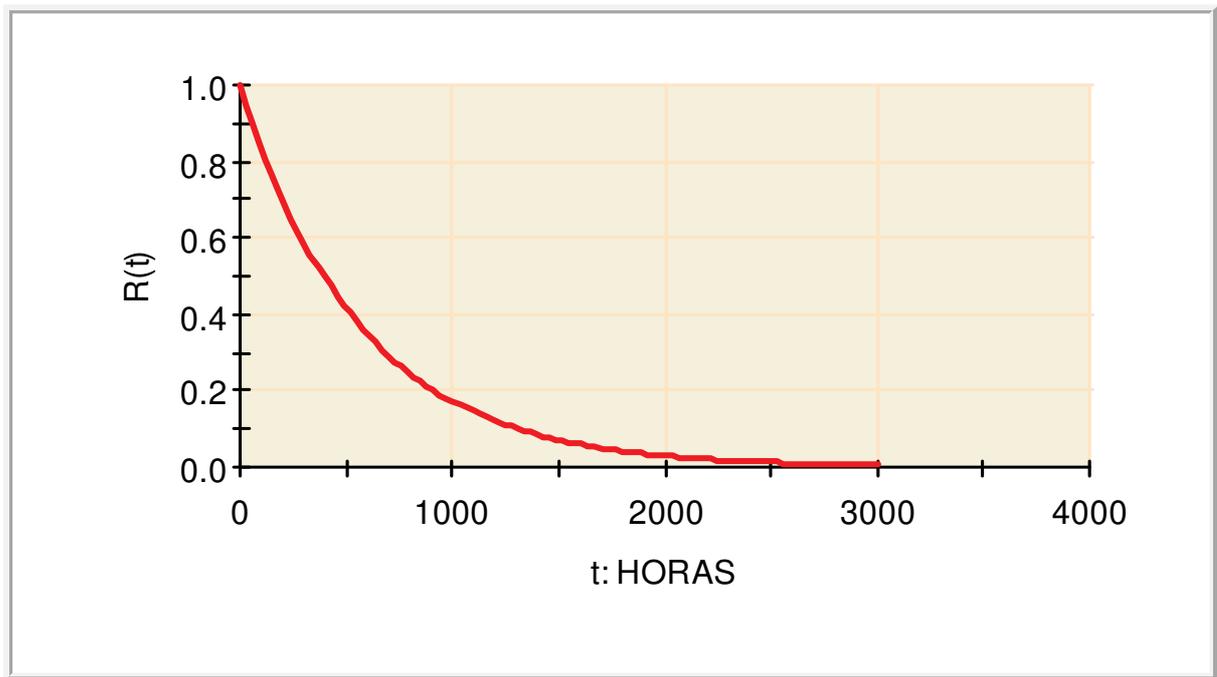
Figura 18 - Taxa de falhas PE-FO-052



Fonte: ProConf (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 19) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 19 - Função de confiabilidade PE-FO-052



Fonte: *ProConf* (2019)

#### 4.5 Forjamento - quinta máquina: PF-FO-016

A Tabela 19 e Tabela 20 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 19 - *TBF* de PF-FO-016

TBF PF-FO-016							
1,18	72	189	9	72	234	3,13	306
9	72	243	9	126	243	27	486
45	90	378	45	126	378	72	
54	126	423	54	189	423	225	
54	189	495	54	189	495	252	

Fonte: Autor (2019)

Tabela 20 - TTR de PF-FO-016

TTR PF-FO-016					
0,15	0,23	0,38	0,48	21,17	0,87
0,22	0,18	0,33	0,75	3,27	
2,03	0,28	0,35	0,22	0,67	
0,17	0,48	0,37	0,05	1,12	
0,17	1,70	16,98	0,50	1,55	

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 21 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de *TBF*. Os modelos Weibull e exponencial não foram rejeitados pelo *ProConf*. Por parcimônia, escolheu-se o modelo exponencial. Para os dados de *TTR*, os modelos, normal e lognormal não foram ajustados, usou-se então a média aritmética.

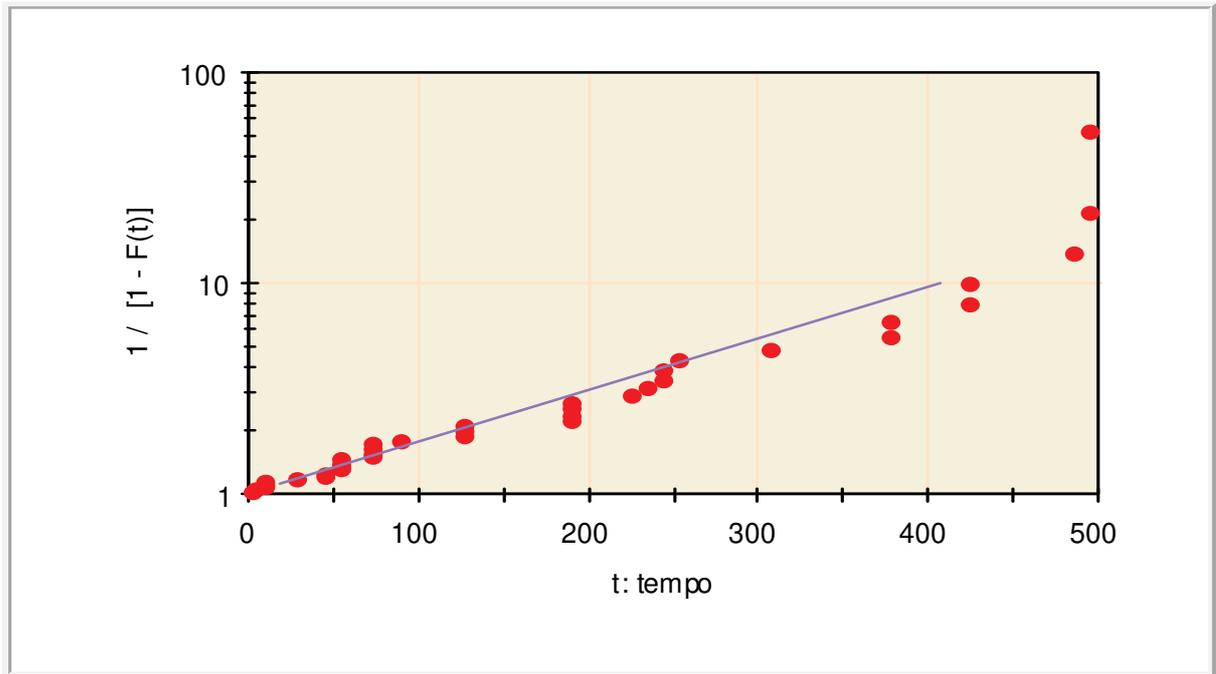
Tabela 21 - Ajustes da distribuição da amostra da PF-FO-016

Teste	Teste Qui-quadrado	Nível de significância	Teste KS	Nível de significância	Rejeitada
Exponencial	8,81	0,1170	0,1209	0,1812	Não
Weibull	8,45	0,0764	0,1265	0,1366	Não

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 20 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Graficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis e confirmam a escolha.

Figura 20 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da PF-FO-016



Fonte: *ProConf* (2019)

O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 22 e as análises referente a amostra são apresentadas na sequência.

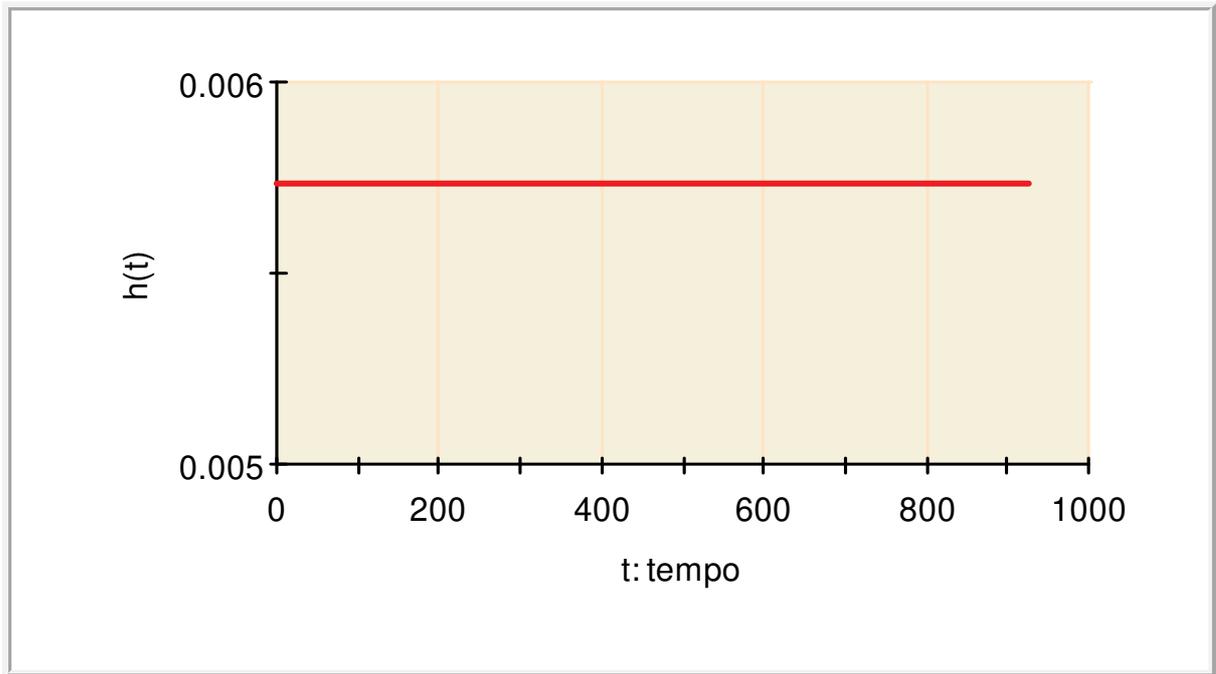
Tabela 22 - Modelo de máxima verossimilhança para PF-FO-016

Parâmetro	Valor modelado
Modelo de distribuição TBF	Exponencial
Modelo de distribuição TTR	Média aritmética
Fator de localização $t_0$	0
Taxa de falhas	0,0057
Intervalo de confiança para a taxa de falhas	0,0039 até 0,0076
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	11,70%
Nível de significância pelo teste $K-S$	18,12%
$MTBF$	174,52 horas
$MTTR$	0,83 horas
$AV$	99,53%
$R(t)$	$R(t) = e^{-(0,0057t)}$

Fonte: Autor (2019)

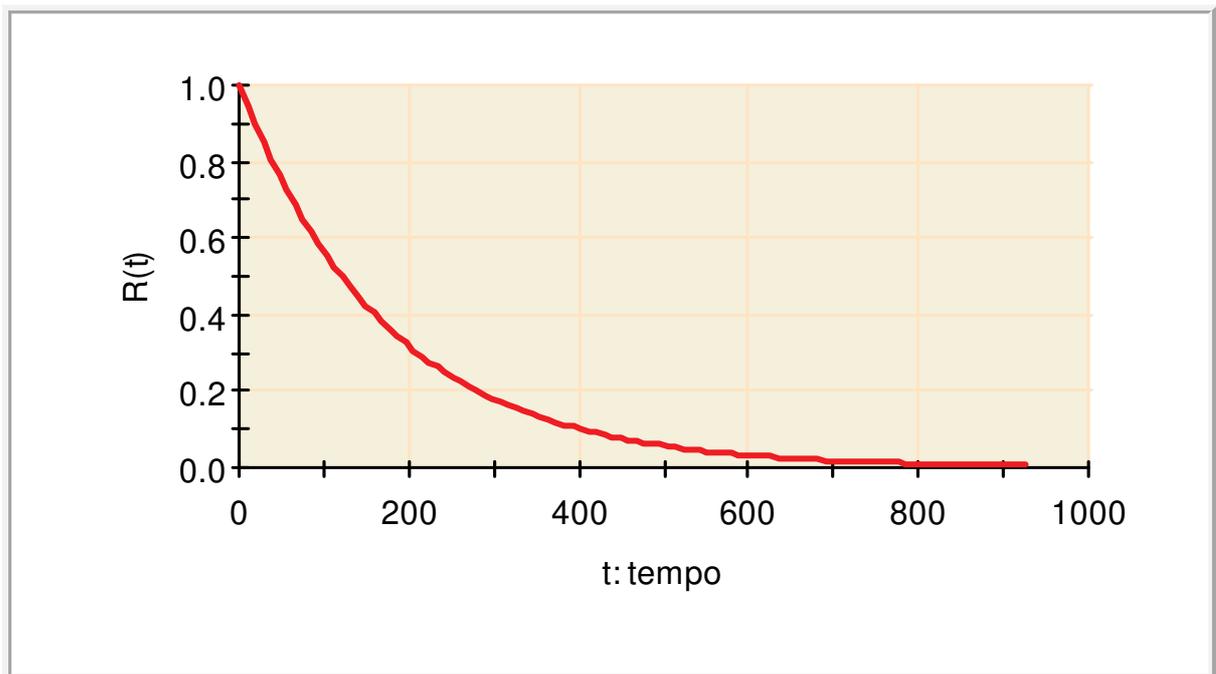
A taxa de falhas (Figura 21) obtida na análise se mostrou constante, comportamento característico de um equipamento em fase de maturidade.

Figura 21 - Taxa de falhas PF-FO-016

Fonte: *ProConf* (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 22) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 22 - Função de confiabilidade PF-FO-016

Fonte: *ProConf* (2019)

#### 4.6 Corte: PC-CO-001

A Tabela 23 e Tabela 24 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 23 - TBF de PC-CO-001

TBF PC-CO-001								
135	423	9	9	9	108	108	81	72
189	513	99	117	27	18	162	63	108
783	45	18	9	72	45	135	234	99
225	36	108	99	9	279	18	9	81
1134	36	9	225	117	306	99	9	9

Fonte: Autor (2019)

Tabela 24 - TTR de PC-CO-001

TTR PC-CO-001											
0,73	0,77	1,48	0,08	0,27	13,20	8,75	0,10	0,53	0,25	1,10	1,58
0,85	0,98	0,33	0,42	8,02	0,83	1,10	0,58	1,62	3,70	3,65	0,27
0,02	0,33	5,88	2,57	0,23	18,98	3,55	0,98	0,43	0,15	0,95	0,70
2,68	0,53	0,18	5,28	3,12	1,65	1,62	0,98	2,47	0,22	2,62	
10,43	0,18	0,58	0,88	1,32	0,45	2,02	0,35	1,30	1,20	9,72	

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 25 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de *TBF*. O modelo Weibull não foi rejeitado pelo *ProConf*, então foi definido para essa análise. Para os dados de *TTR*, foi ajustado o modelo lognormal.

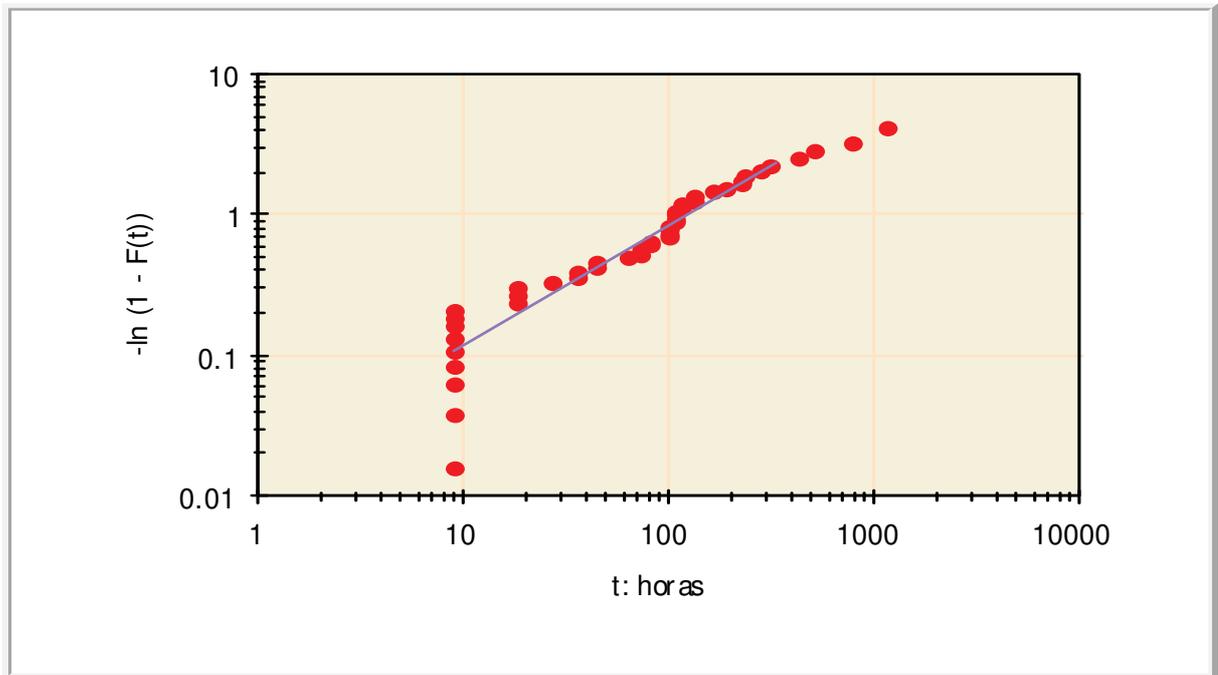
Tabela 25 - Ajustes da distribuição da amostra da PC-CO-001

Teste	Teste Qui-quadrado	Nível de significância	Teste KS	Nível de significância	Rejeitada
Exponencial	29,11	0,0001	0,1559	0,0078	Sim
Weibull	4,73	0,316	0,1196	0,1048	Não

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 23 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Graficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis e confirmam a escolha.

Figura 23 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da PC-CO-001



Fonte: *ProConf* (2019)

O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 26 e as análises referente a amostra são apresentadas na sequência.

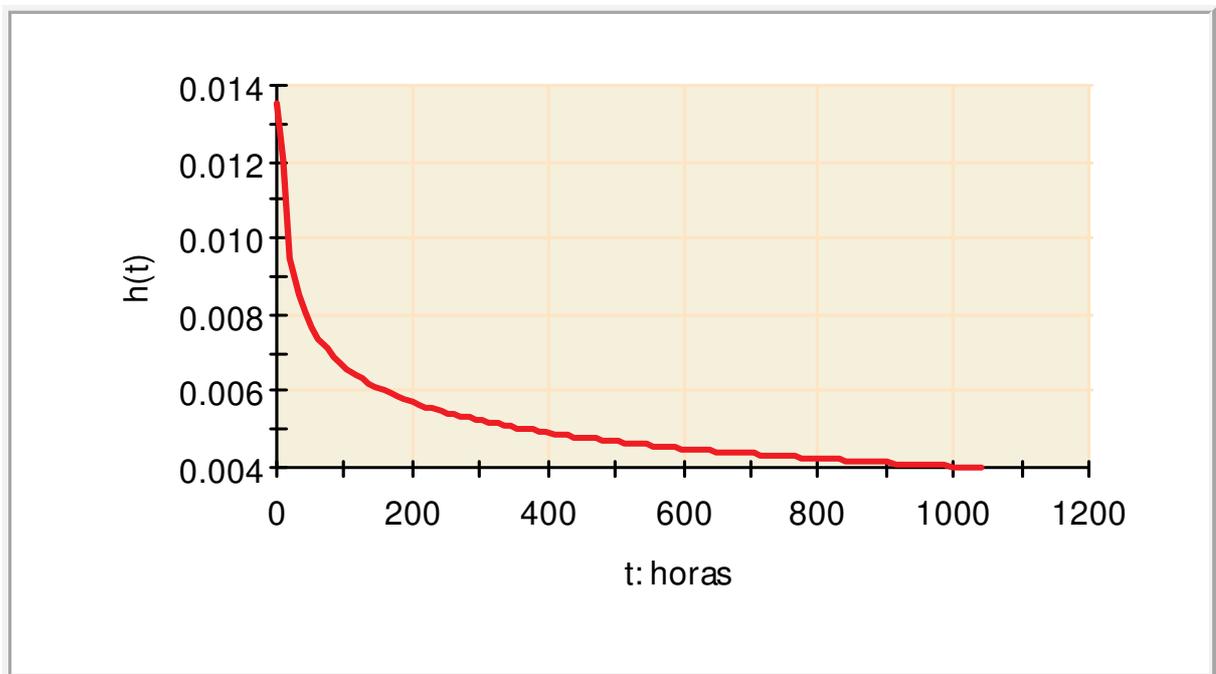
Tabela 26 - Modelo de máxima verossimilhança para PC-CO-001

Parâmetro	Valor modelado
Modelo de distribuição TBF	Weibull
Modelo de distribuição TTR	Lognormal
Fator de localização $t_0$	0
Fator de forma mais provável	0,81
Intervalo de confiança para o fator de forma	0,59 até 0,95
Fator de escala mais provável	126,46 horas
Intervalo de confiança para o fator de escala	81,55 até 184,90
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	31,60%
Nível de significância pelo teste $K-S$	10,48%
<i>MTBF</i>	142,74 horas
<i>MTTR</i>	2,52 horas
<i>AV</i>	98,27%
<i>R(t)</i>	$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{126,46}\right)^{0,81}}$

Fonte: Autor (2019)

A taxa de falhas (Figura 24) obtida na análise se mostrou decrescente, comportamento característico de um equipamento em fase de mortalidade infantil.

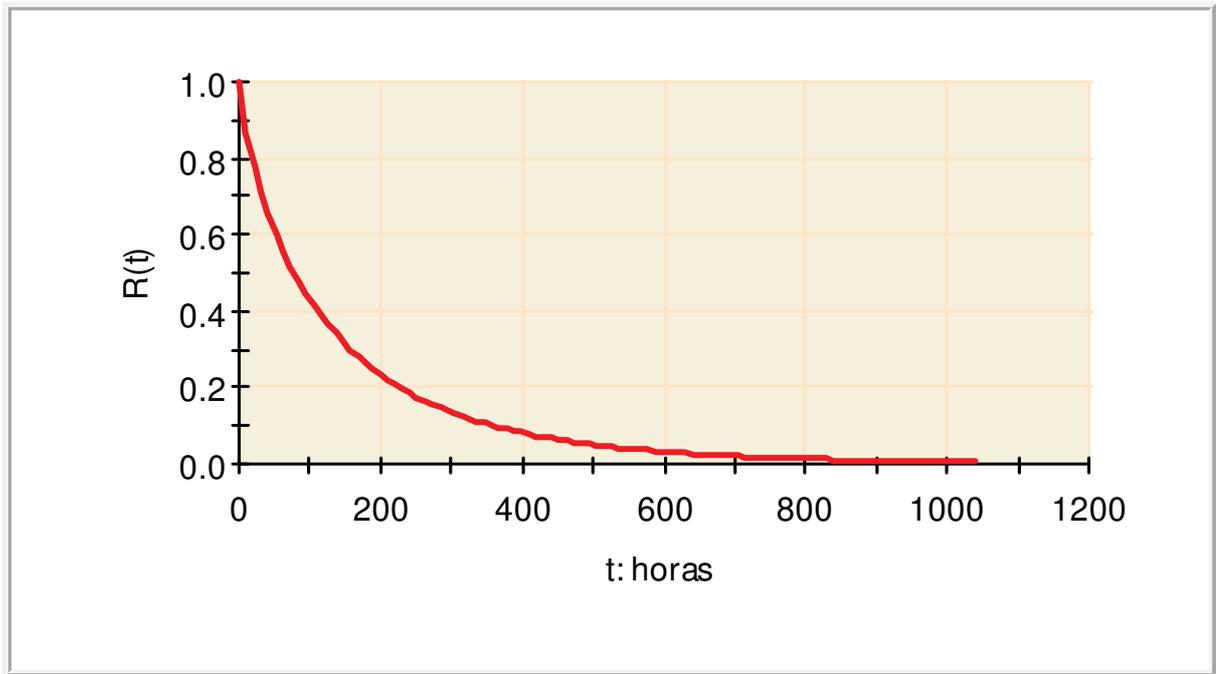
Figura 24 - Taxa de falhas PC-CO-001



Fonte: ProConf (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 25) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 25 - Função de confiabilidade PC-CO-001



Fonte: *ProConf* (2019)

#### 4.7 Corte: PC-CO-003

A Tabela 27 e Tabela 28 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 27 - TBF de PC-CO-003

TBF PC-CO-003					
18	108	27	18	27	198
162	54	243	81	18	63
18	135	72	99	72	18
9	9	135	9	99	36
63	9	9	18	63	18

Fonte: Autor (2019)

Tabela 28 - TTR de PC-CO-003

TTR PC-CO-003											
0,05	0,22	0,60	0,35	0,63	1,05	1,40	0,35	0,18	1,87	9,12	0,42
9,20	1,45	0,42	0,17	11,10	0,12	0,77	0,73	0,88	8,03	0,67	9,63
1,10	0,73	0,68	0,07	0,27	2,20	0,38	0,57	15,32	1,13	0,20	1,67
0,67	2,97	0,37	0,23	1,48	14,58	0,38	0,90	0,20	0,47	0,32	0,33
0,47	0,62	1,05	0,27	0,22	0,68	0,58	0,40	1,30	0,70	9,32	0,52
2,15	0,50	0,25	0,62	1,22	1,12	0,28	0,75	9,32	9,32	0,82	0,38
0,33	0,77	4,15	1,20	1,42	0,37	0,70	1,02	0,65	1,17	0,63	3,02
0,95	0,58	0,27	0,93	1,75	0,58	0,85	0,18	0,97	0,72	0,63	3,02
0,30	0,27	0,40	2,37	0,95	0,20	0,32	0,58	1,03	1,52	0,03	

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 29 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de *TBF*. O modelo exponencial não foi rejeitado pelo *ProConf*, então foi definido para essa análise. Para os dados de *TTR*, nenhum modelo foi ajustado, então utilizou-se a média aritmética.

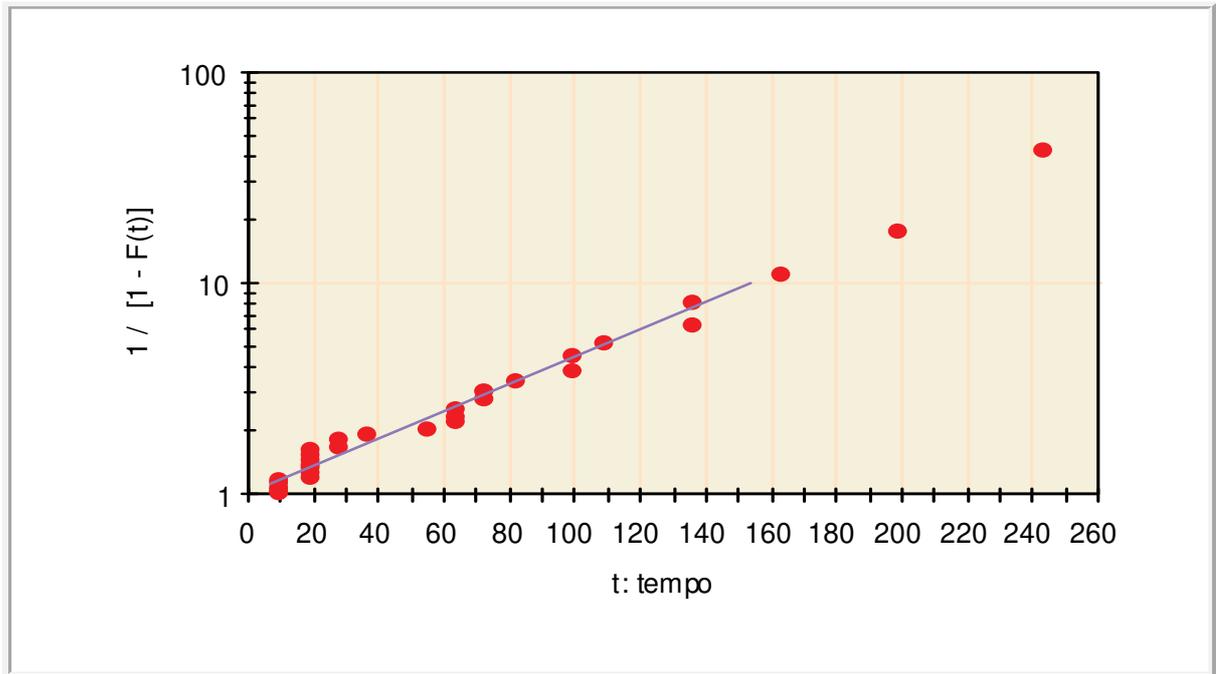
Tabela 29 - Ajustes da distribuição da amostra da PC-CO-003

Teste	Teste Qui-quadrado	Nível de significância	Teste KS	Nível de significância	Rejeitada
Exponencial	0,77	0,9427	0,1535	0,0691	Não
Weibull	0,83	0,842	0,1647	0,037	Sim

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 26 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Gráficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis e confirmam a escolha.

Figura 26 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da PC-CO-003



Fonte: *ProConf* (2019)

O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 30 e as análises referente a amostra são apresentadas na sequência.

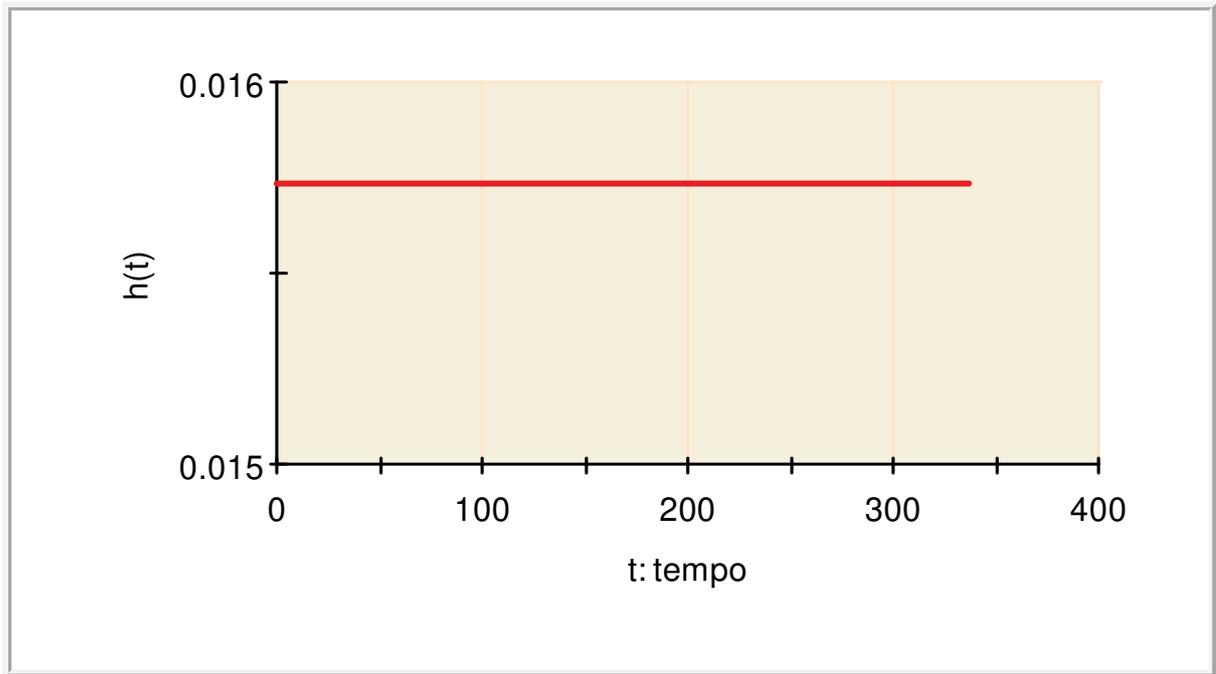
Tabela 30 - Modelo de máxima verossimilhança para PC-CO-003

Parâmetro	Valor modelado
Modelo de distribuição TBF	Exponencial
Modelo de distribuição TTR	Média aritmética
Fator de localização $t_0$	0
Taxa de falhas	0,0157
Intervalo de confiança para a taxa de falhas	0,0105 até 0,0217
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	94,27%
Nível de significância pelo teste $K-S$	6,91%
<i>MTBF</i>	63,6 horas
<i>MTTR</i>	1,647 horas
<i>AV</i>	97,48%
<i>R(t)</i>	$R(t) = e^{-(0,0157t)}$

Fonte: Autor (2019)

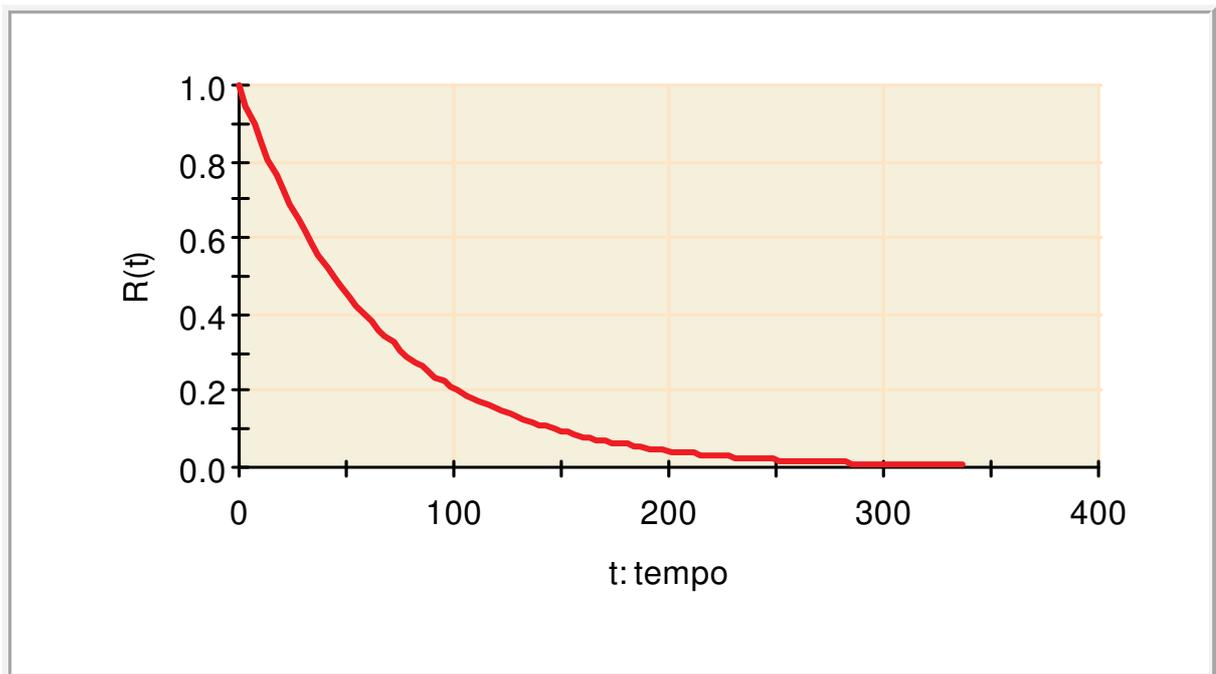
A taxa de falhas (Figura 27) obtida na análise se mostrou constante, comportamento característico de um equipamento em fase de maturidade.

Figura 27 - Taxa de falhas PC-CO-003

Fonte: *ProConf* (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 28) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 28 - Função de confiabilidade PC-CO-003

Fonte: *ProConf* (2019)

#### 4.8 Corte: PC-CO-004

A Tabela 31 e Tabela 32 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 31 - TBF de PC-CO-004

TBF PC-CO-004								
108	63	18	207	9	117	54	99	63
45	27	45	171	297	36	18	81	63
252	63	9	45	18	72	9	18	54
81	36	27	9	27	135	45	90	117
162	9	207	63	18	117	9	90	9

Fonte: Autor (2019)

Tabela 32 - TTR de PC-CO-004

TTR PC-CO-004											
0,12	1,48	0,22	1,20	2,97	0,75	1,08	1,02	0,90	0,92	0,32	1,00
9,48	10,05	0,12	1,65	0,55	0,50	1,50	0,00	1,88	0,12	1,67	3,42
2,53	1,13	0,80	6,83	0,77	7,20	0,53	1,08	0,43	4,73	4,62	0,40
2,05	9,92	0,42	9,85	3,75	0,58	1,05	1,05	1,68	0,58	3,63	
0,47	0,80	1,55	0,92	0,37	1,27	2,00	4,62	3,63	20,38	0,17	
0,27	0,43	9,68	1,92	0,95	0,00	2,22	1,47	4,05	0,98	2,12	
2,02	4,68	2,57	0,32	0,85	4,87	2,07	1,33	3,57	0,22	0,37	
0,47	1,88	3,68	2,28	1,07	7,40	5,43	0,32	1,93	0,17	2,20	

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 33 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de *TBF*. O modelo exponencial não foi rejeitado pelo *ProConf*, então foi definido para essa análise. Para os dados de *TTR*, nenhum modelo foi ajustado, então utilizou-se a média aritmética.

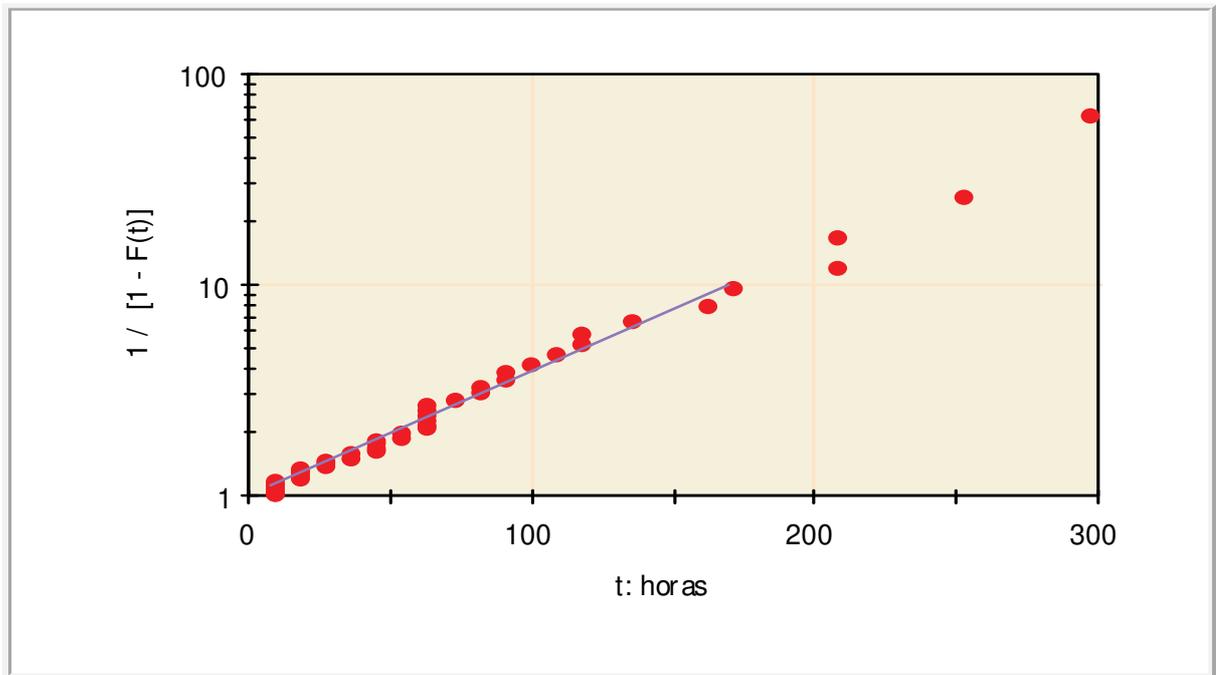
Tabela 33 - Ajustes da distribuição da amostra da PC-CO-004

Teste	Teste Qui-quadrado	Nível de significância	Teste KS	Nível de significância	Rejeitada
Exponencial	2,03	0,8455	0,1169	0,1228	Não
Weibull	1,22	0,8747	0,0943	0,2202	Não

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 29 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Graficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis e confirmam a escolha.

Figura 29 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da PC-CO-004



Fonte: *ProConf* (2019)

O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 34 e as análises referente a amostra são apresentadas na sequência.

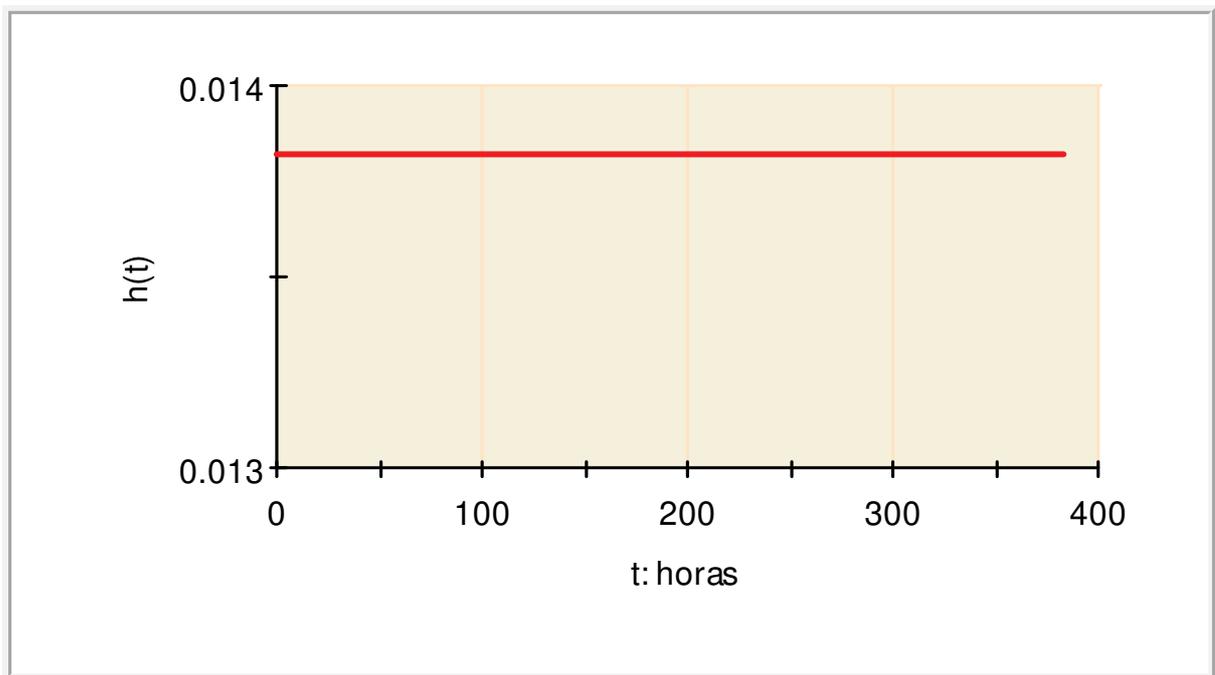
Tabela 34 - Modelo de máxima verossimilhança para PC-CO-004

Parâmetro	Valor modelado
Modelo de distribuição TBF	Exponencial
Modelo de distribuição TTR	Média aritmética
Fator de localização $t_0$	0
Taxa de falhas	1,1255
Intervalo de confiança para a taxa de falhas	0,8202 até 1,3175
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	84,55%
Nível de significância pelo teste $K-S$	12,28%
<i>MTBF</i>	72,43 horas
<i>MTTR</i>	2,375 horas
<i>AV</i>	96,83%
<i>R(t)</i>	$R(t) = e^{-(1,1255t)}$

Fonte: Autor (2019)

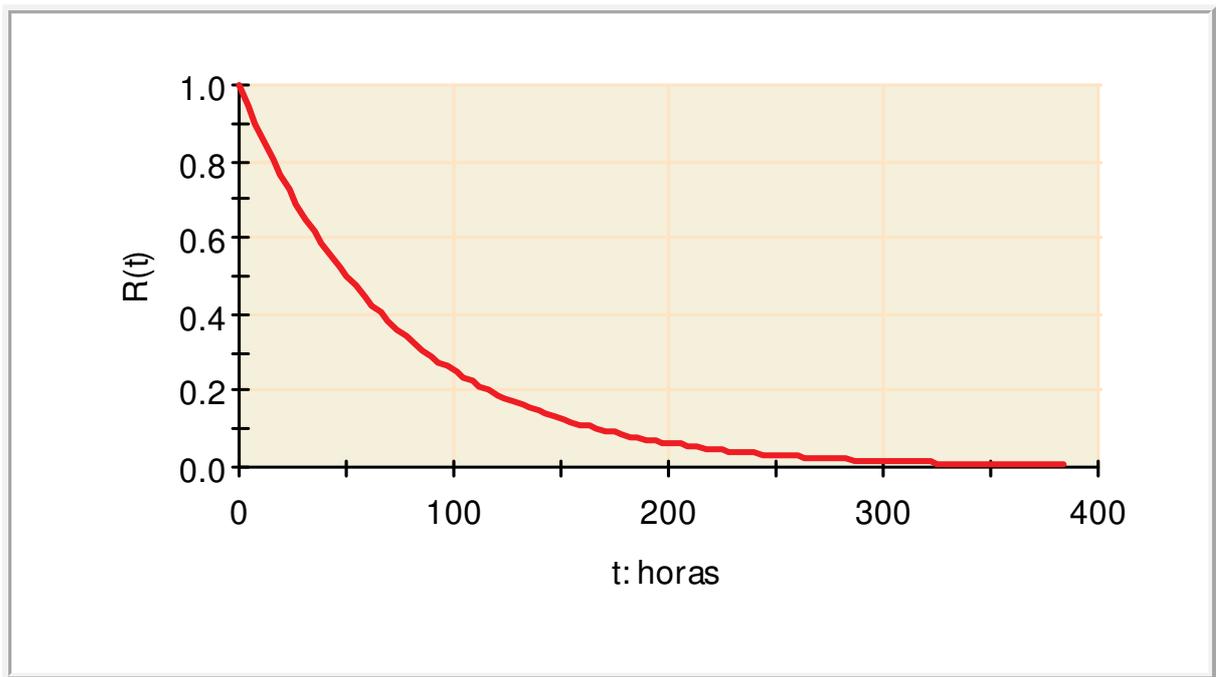
A taxa de falhas (Figura 30) obtida na análise se mostrou constante, comportamento característico de um equipamento em fase de maturidade.

Figura 30 - Taxa de falhas PC-CO-004

Fonte: *ProConf* (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 31) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 31 - Função de confiabilidade PC-CO-004



Fonte: *ProConf* (2019)

#### 4.9 Corte: SH-CO-001

A Tabela 35 e Tabela 36 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 35 - TBF de SH-CO-001

TBF SH-CO-001								
36	180	216	72	144	459	351	549	45
9	171	72	18	180	180	63	243	9
126	198	297	45	135	117	306	81	144
387	45	216	810	171	9	36	108	108
63	18	234	126	180	9	351	9	54

Fonte: Autor (2019)

Tabela 36 - TTR de SH-CO-001

TTR SH-CO-001											
11,45	3,08	26,43	0,15	2,40	2,00	3,00	0,73	0,52	0,82	0,60	0,38
9,87	0,53	0,83	0,15	1,97	2,38	0,70	0,50	0,73	3,98	0,88	3,73
0,42	2,17	0,72	2,88	3,93	2,92	5,57	0,70	0,85	0,37	1,20	1,77
0,28	1,20	9,97	0,95	2,88	2,03	1,87	0,18	0,18	0,60	0,27	
1,72	0,27	0,82	0,12	1,37	0,88	0,17	1,42	1,57	0,47	0,27	
0,58	5,78	0,92	0,08	0,58	2,35	1,07	2,18	0,73	2,15	1,72	

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 37 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de *TBF*. O modelo exponencial não foi rejeitado pelo *ProConf*, então foi definido para essa análise. Para os dados de *TTR*, foi ajustado o modelo lognormal.

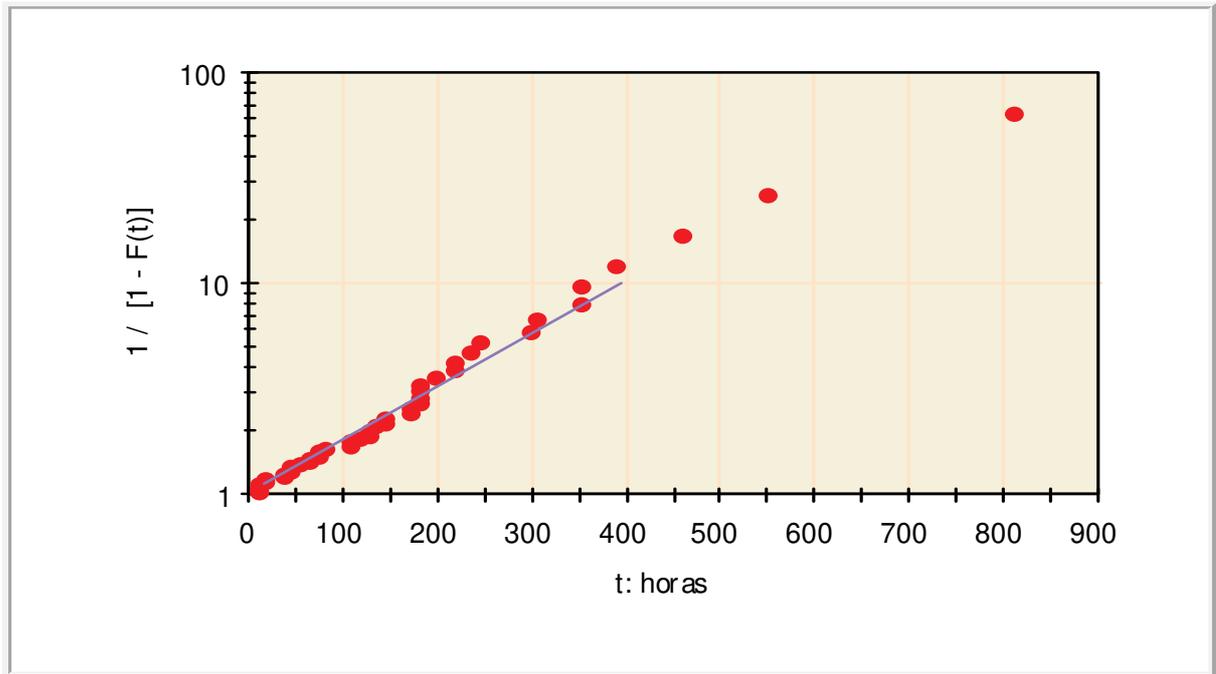
Tabela 37 - Ajustes da distribuição da amostra da SH-CO-001

Teste	Teste Qui-quadrado	Nível de significância	Teste KS	Nível de significância	Rejeitada
Exponencial	2,72	0,7425	0,0824	0,2711	Não
Weibull	2,68	0,6129	0,0796	0,2835	Não

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 32 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Gráficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis e confirmam a escolha.

Figura 32 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da SH-CO-001



Fonte: *ProConf* (2019)

O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 38 e as análises referente a amostra são apresentadas na sequência.

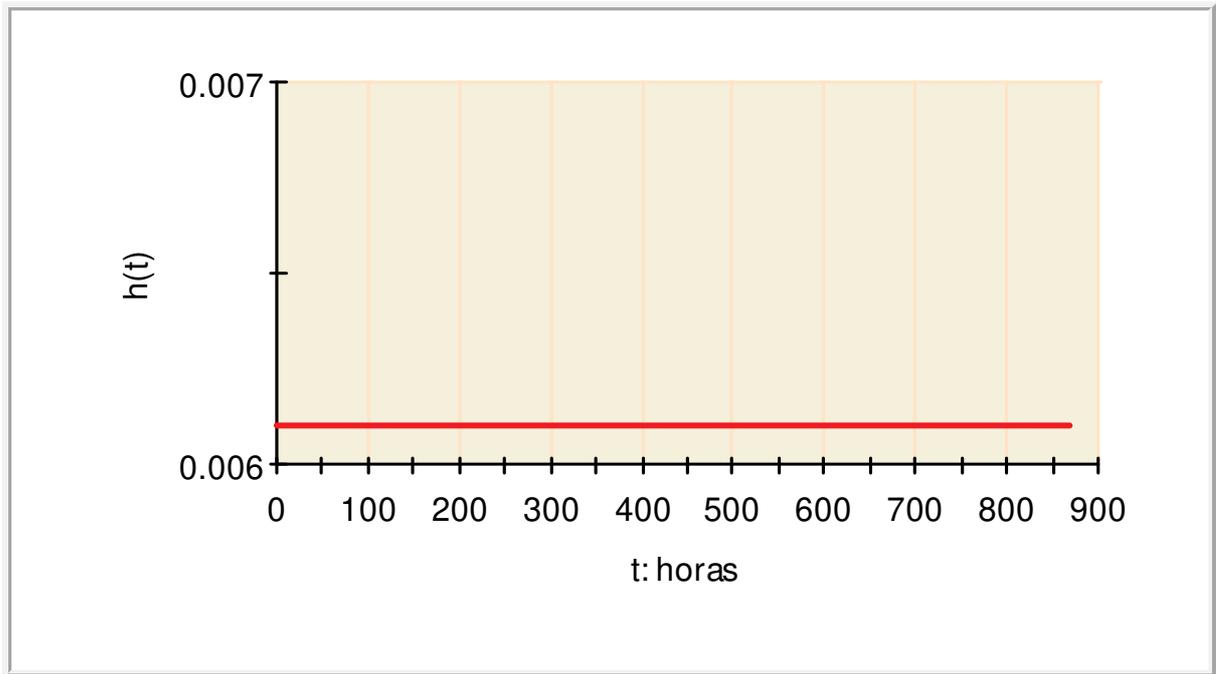
Tabela 38 - Modelo de máxima verossimilhança para SH-CO-001

Parâmetro	Valor modelado
Modelo de distribuição TBF	Exponencial
Modelo de distribuição TTR	Lognormal
Fator de localização $t_0$	0
Taxa de falhas	0,0061
Intervalo de confiança para a taxa de falhas	0,0043 até 0,0079
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	74,25%
Nível de significância pelo teste $K-S$	27,11%
$MTBF$	164,0 horas
$MTTR$	2,077 horas
$AV$	98,75%
$R(t)$	$R(t) = e^{-(0,0061t)}$

Fonte: Autor (2019)

A taxa de falhas (Figura 33) obtida na análise se mostrou constante, comportamento característico de um equipamento em fase de maturidade.

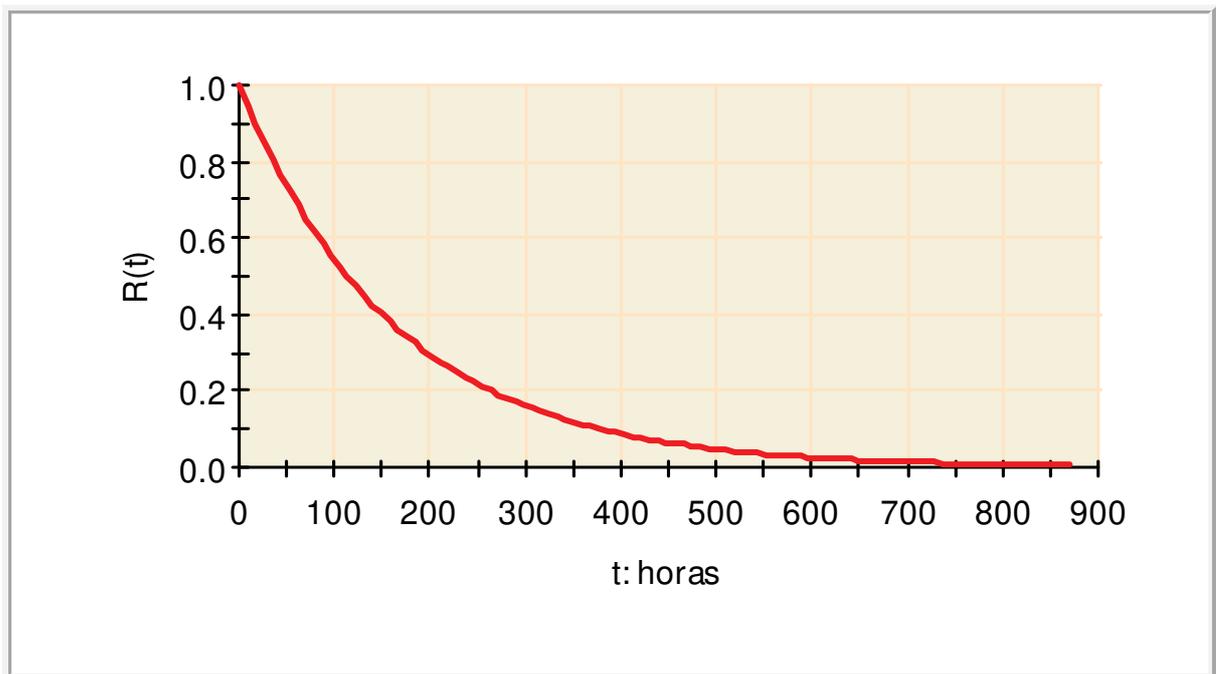
Figura 33 - Taxa de falhas SH-CO-001



Fonte: *ProConf* (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 34) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 34 - Função de confiabilidade SH-CO-001



Fonte: *ProConf* (2019)

#### 4.10 Corte: SH-CO-002

A Tabela 39 e Tabela 40 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 39 - TBF de SH-CO-002

TBF SH-CO-002								
63	18	153	45	9	225	504	18	9
108	90	108	117	18	72	306	45	45
585	216	9	54	297	378	423	27	54
36	9	63	18	108	18	135	135	9
198	27	288	108	216	81	198	9	45

Fonte: Autor (2019)

Tabela 40 - TTR de SH-CO-002

TTR SH-CO-002											
2,27	22,52	4,00	10,68	0,87	3,53	2,63	12,25	0,77	0,53	0,35	0,70
14,75	0,65	3,02	3,12	2,07	2,98	1,62	0,35	0,82	2,08	0,67	1,18
0,52	1,13	0,72	0,43	9,27	0,55	1,18	0,48	4,52	20,50	0,43	0,67
0,47	0,47	0,23	0,20	4,03	0,23	0,40	1,33	0,30	7,77	0,87	1,63
3,33	1,78	3,80	0,52	1,75	8,72	0,58	2,70	0,73	4,10	3,27	0,38
0,90	0,65	0,18	0,28	2,75	1,28	1,17	5,62	0,67	3,82	0,67	0,53
1,52	0,35	0,95	6,67	0,55	0,40	2,82	0,65	19,25	3,07	1,67	2,70
5,55	1,98	1,07	0,40	1,57	2,45	0,23	1,32	5,73	0,57	0,55	0,52

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 41 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de *TBF*. O modelo exponencial não foi rejeitado pelo *ProConf*, então foi definido para essa análise. Para os dados de *TTR*, nenhum modelo foi ajustado, então utilizou-se a média aritmética.

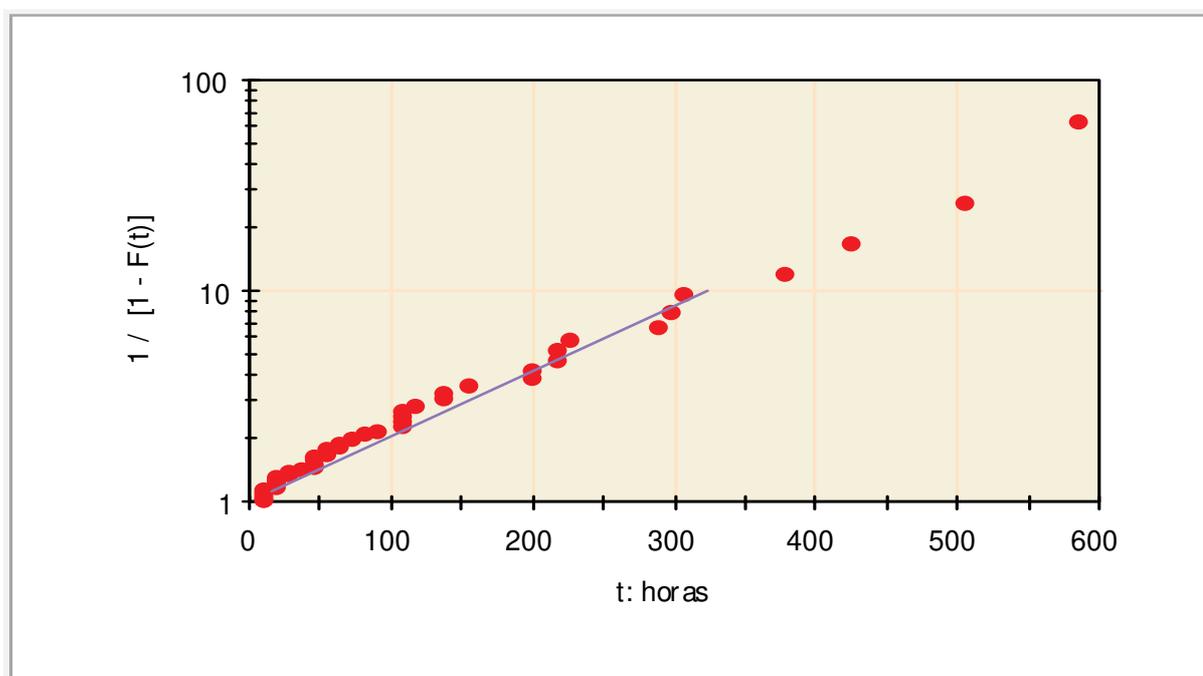
Tabela 41 - Ajustes da distribuição da amostra da SH-CO-002

Teste	Teste Qui-quadrado	Nível de significância	Teste KS	Nível de significância	Rejeitada
Exponencial	1,13	0,9515	0,1119	0,1623	Não
Weibull	0,43	0,98	0,0934	0,2239	Não

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 35 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Graficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis e confirmam a escolha.

Figura 35 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da SH-CO-002



Fonte: *ProConf* (2019)

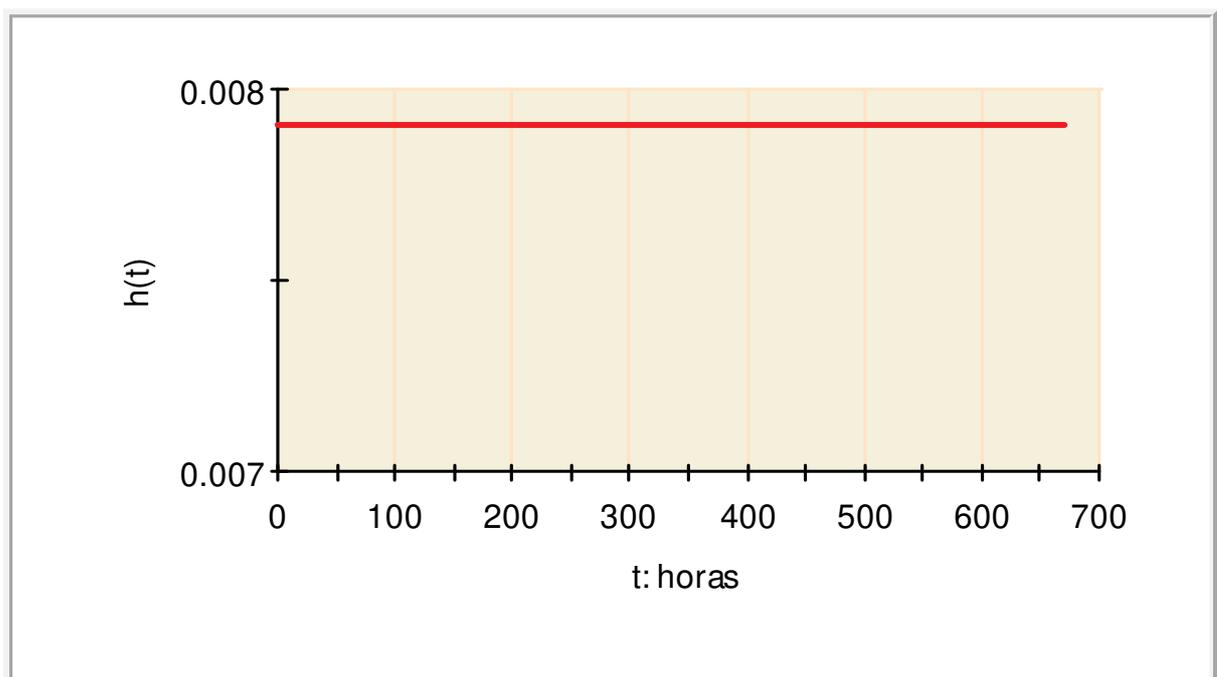
O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 42 e as análises referente a amostra são apresentadas na sequência.

Tabela 42 - Modelo de máxima verossimilhança para SH-CO-002

Parâmetro	Valor modelado
Modelo de distribuição TBF	Exponencial
Modelo de distribuição TTR	Média aritmética
Fator de localização $t_0$	0
Taxa de falhas	0,0079
Intervalo de confiança para a taxa de falhas	0,0056 até 0,0102
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	95,15%
Nível de significância pelo teste $K-S$	16,23%
<i>MTBF</i>	126,6 horas
<i>MTTR</i>	2,765 horas
<i>AV</i>	97,86%
<i>R(t)</i>	$R(t) = e^{-(0,0079t)}$

A taxa de falhas (Figura 36) obtida na análise se mostrou constante, comportamento característico de um equipamento em fase de maturidade.

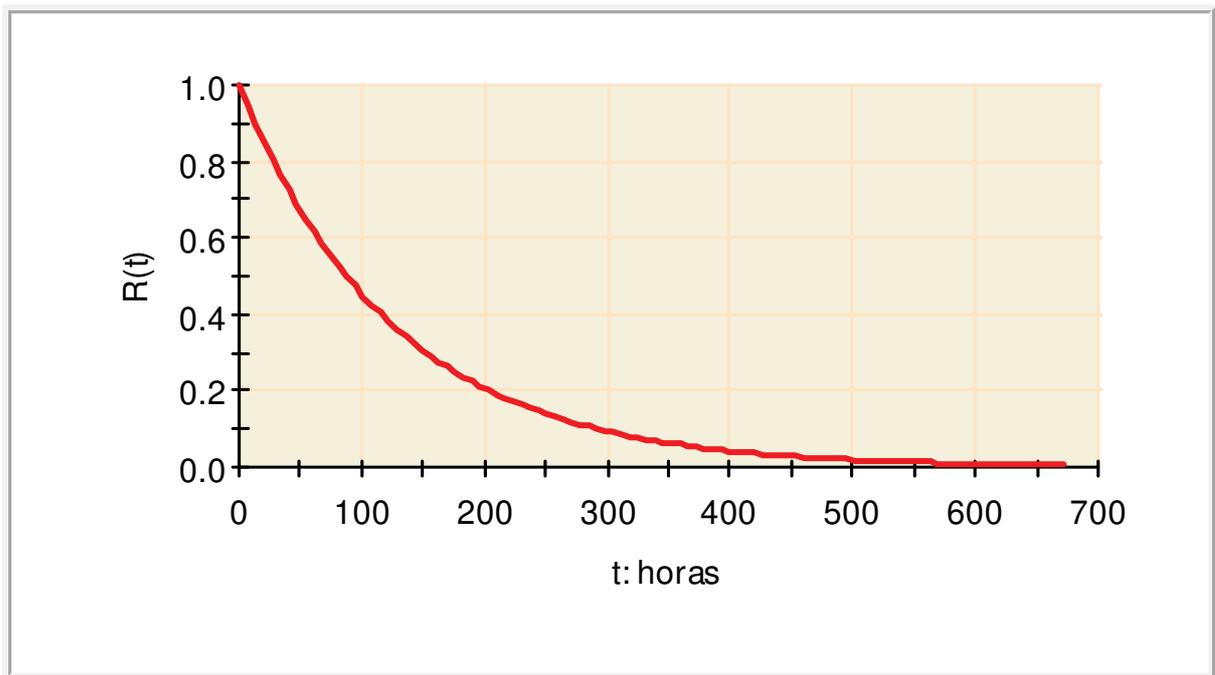
Figura 36 - Taxa de falhas SH-CO-002



Fonte: *ProConf* (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 37) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 37 - Função de confiabilidade SH-CO-002



Fonte: *ProConf* (2019)

#### 4.11 Corte: SH-CO-003

A Tabela 43 e Tabela 44 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 43 - TBF de SH-CO-003

TBF SH-CO-003			
549	630	18	216
216	585	567	180
36	45	468	90
63	279	63	657
36	126	531	234

Fonte: Autor (2019)

Tabela 44 - TTR de SH-CO-003

TTR SH-CO-003								
2,00	1,87	1,10	2,62	0,30	6,80	1,62	2,02	0,75
9,82	1,77	1,57	3,60	0,48	2,57	1,08	0,40	1,27
19,70	13,03	4,95	1,85	2,40	0,42	0,00	3,92	0,70
2,70	0,95	3,90	0,65	7,80	0,00	0,00	1,62	0,72
0,60	0,20	0,78	0,88	10,50	1,07	1,93	2,13	0,50

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 45 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de *TBF*. O modelo exponencial não foi rejeitado pelo *ProConf*, então foi definido para essa análise. Para os dados de *TTR*, nenhum modelo foi ajustado, então utilizou-se a média aritmética.

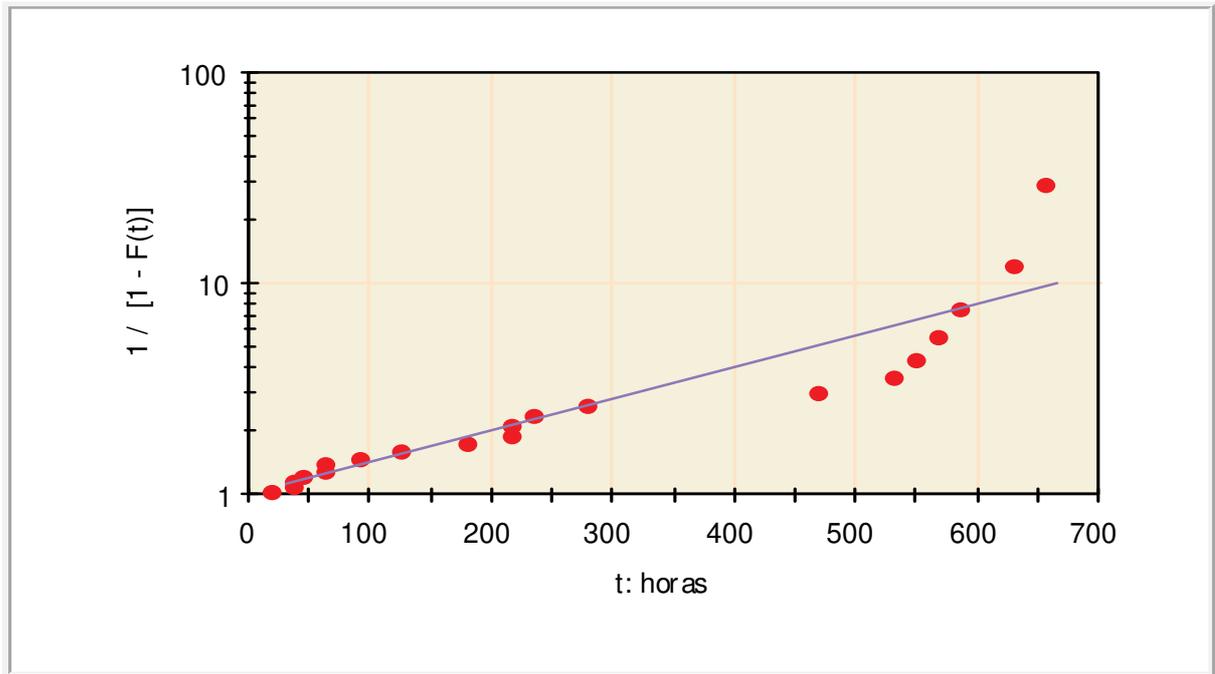
Tabela 45 - Ajustes da distribuição da amostra da SH-CO-003

Teste	Teste Qui-quadrado	Nível de significância	Teste KS	Nível de significância	Rejeitada
Exponencial	2,75	0,4310	0,1626	0,1790	Não
Weibull	2,92	0,2321	0,1648	0,1646	Não

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 38 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Gráficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis, neste caso os pontos são mais dispersos devido ao tamanho menor da amostra.

Figura 38 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da SH-CO-003



Fonte: *ProConf* (2019)

O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 46 e as análises referente a amostra são apresentadas na sequência.

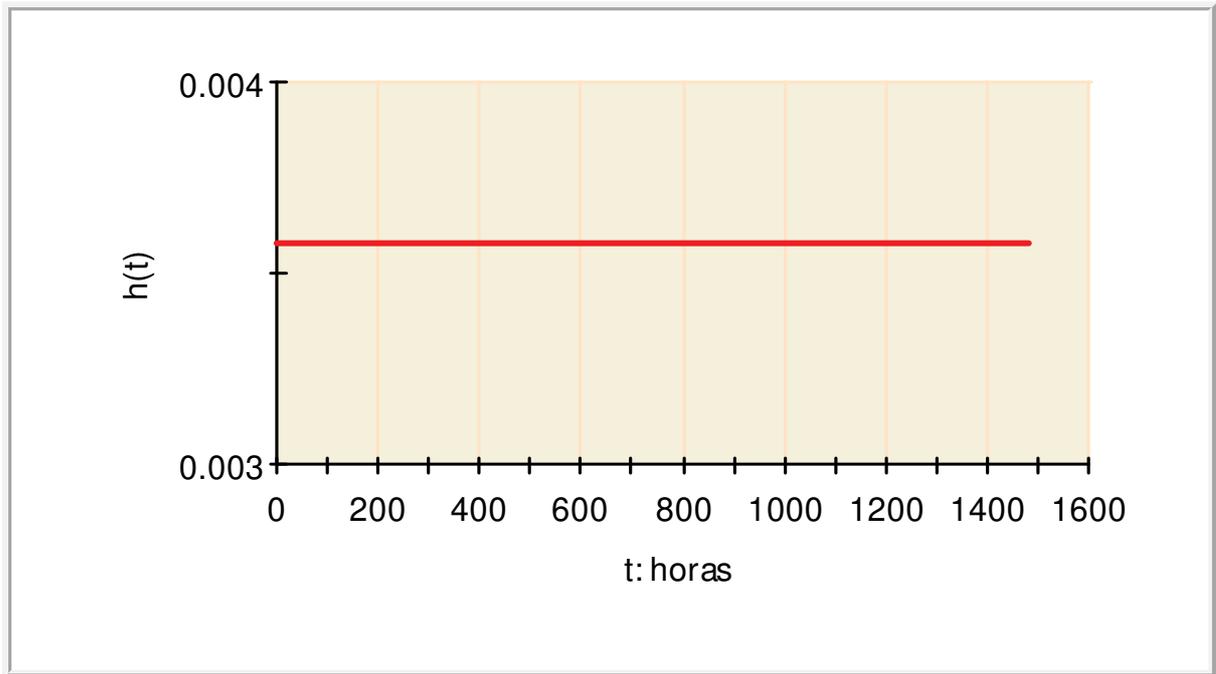
Tabela 46 - Modelo de máxima verossimilhança para SH-CO-003

Parâmetro	Valor modelado
Modelo de distribuição TBF	Exponencial
Modelo de distribuição TTR	Média aritmética
Fator de localização $t_0$	0
Taxa de falhas	0,0036
Intervalo de confiança para a taxa de falhas	0,0021 até 0,0053
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	43,10%
Nível de significância pelo teste $K-S$	17,90%
<i>MTBF</i>	279,45 horas
<i>MTTR</i>	2,789 horas
<i>AV</i>	99,01%
<i>R(t)</i>	$R(t) = e^{-(0,0036t)}$

Fonte: Autor (2019)

A taxa de falhas (Figura 39) obtida na análise se mostrou constante, comportamento característico de um equipamento em fase de maturidade.

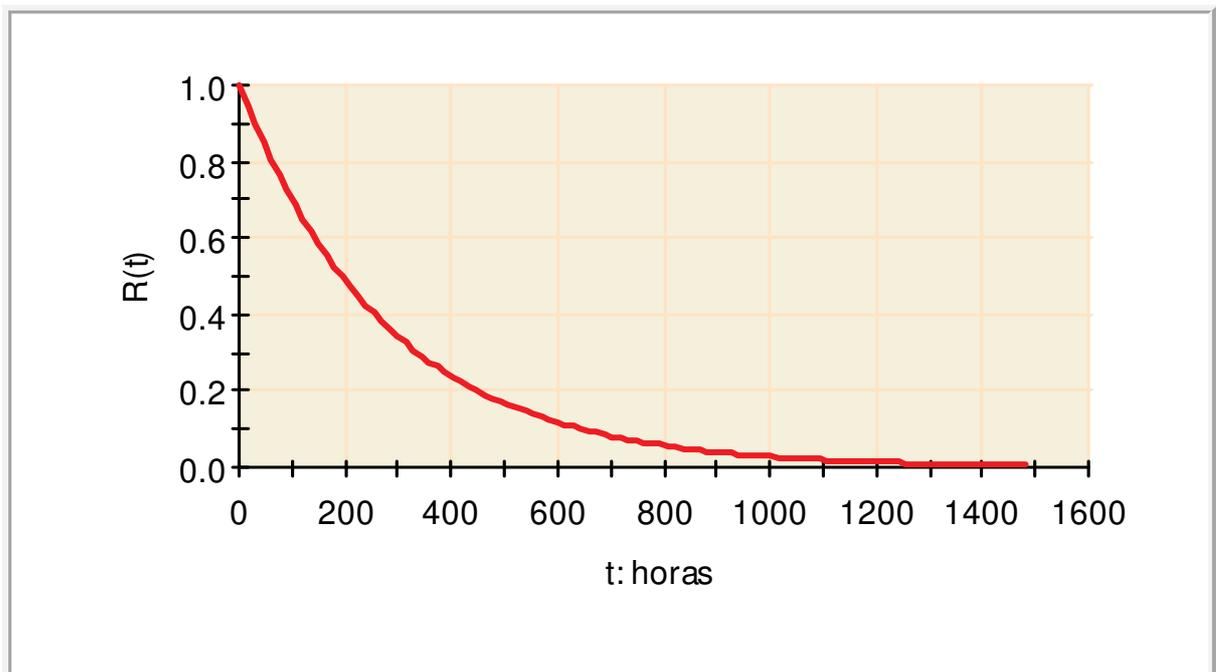
Figura 39 - Taxa de falhas SH-CO-003



Fonte: *ProConf* (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 40) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 40 - Função de confiabilidade SH-CO-003



Fonte: *ProConf* (2019)

#### 4.12 Corte: SH-CO-004

A Tabela 47 e Tabela 48 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 47 - TBF de SH-CO-004

TBF SH-CO-004							
1071	315	531	126	54	9	18	180
558	180	117	9	117	144	90	
18	63	54	18	36	90	18	
207	72	27	45	144	144	18	
261	567	117	54	45	54	36	

Fonte: Autor (2019)

Tabela 48 - TTR de SH-CO-004

TTR SH-CO-004							
1,42	0,10	1,72	1,80	3,27	0,48	0,38	0,42
0,32	10,27	4,72	0,45	7,92	45,45	1,35	30,50
11,03	1,07	16,95	9,20	0,65	0,58	9,43	2,80
0,35	1,78	4,25	0,78	22,07	1,65	3,58	15,43
0,17	3,93	0,12	20,58	0,52	0,85	0,48	1,05

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 49 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de *TBF*. O modelo *Weibull* não foi rejeitado pelo *ProConf*, então foi definido para essa análise. Para os dados de *TTR*, foi ajustado o modelo lognormal.

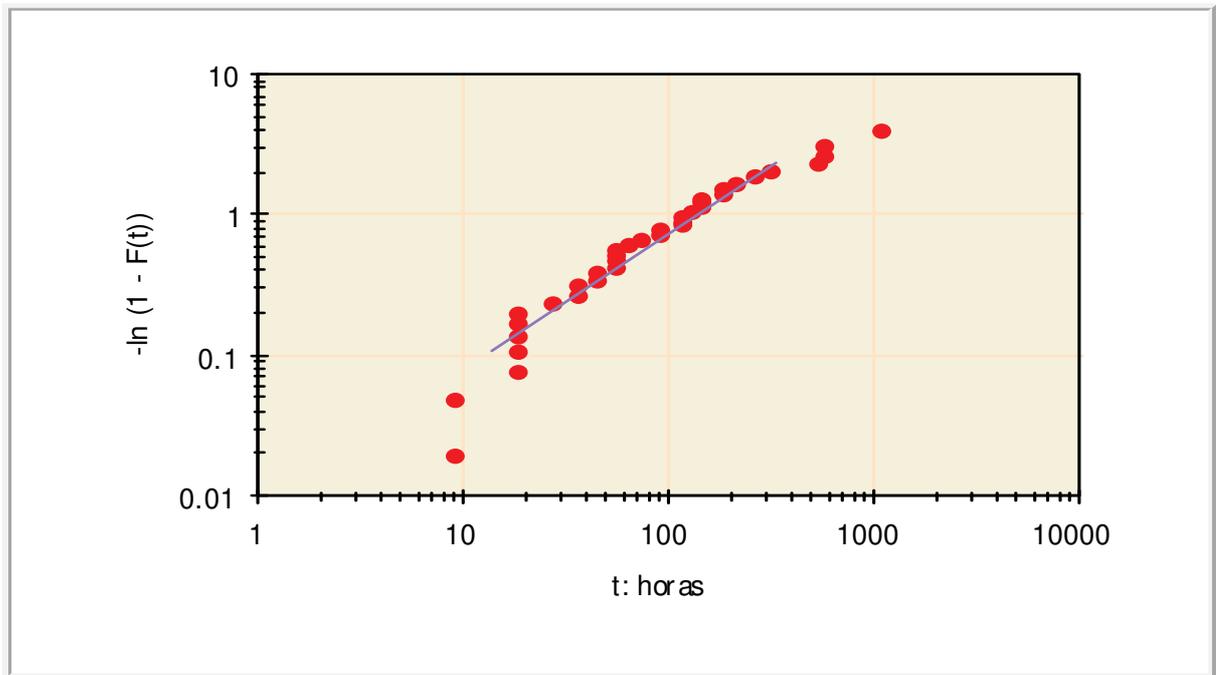
Tabela 49 - Ajustes da distribuição da amostra da SH-CO-004

Teste	Teste Qui-quadrado	Nível de significância	Teste KS	Nível de significância	Rejeitada
Exponencial	20,57	0,0010	0,1515	0,0360	Sim
Weibull	9,49	0,0500	0,1103	0,1992	Não

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 41 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Graficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis e confirmam a escolha.

Figura 41 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da SH-CO-004



Fonte: *ProConf* (2019)

O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 50 e as análises referente a amostra são apresentadas na sequência.

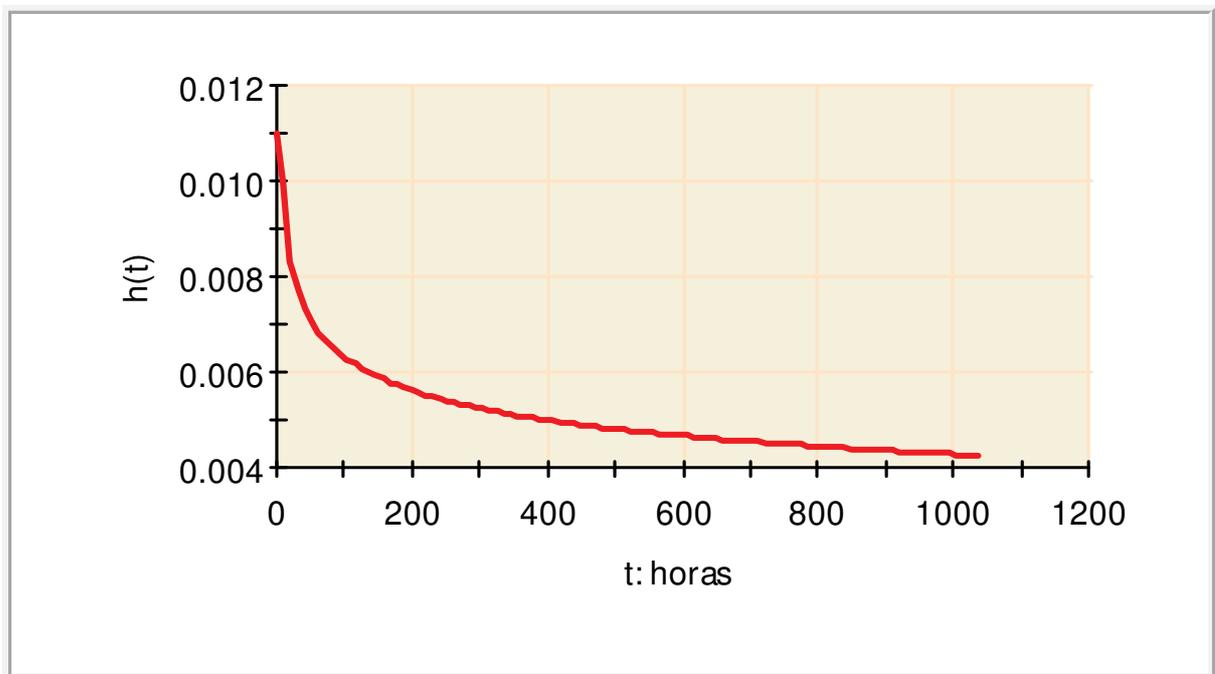
Tabela 50 - Modelo de máxima verossimilhança para SH-CO-004

Parâmetro	Valor modelado
Modelo de distribuição TBF	Weibull
Modelo de distribuição TTR	Lognormal
Fator de localização $t_0$	0
Fator de forma mais provável	0,8655
Intervalo de confiança para o fator de forma	0,613 até 1,035
Fator de escala mais provável	142,93 horas
Intervalo de confiança para o fator de escala	89,24 até 213,74
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	05,00%
Nível de significância pelo teste $K-S$	19,92%
$MTBF$	154,23 horas
$MTTR$	6,77 horas
$AV$	95,79%
$R(t)$	$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{142,93}\right)^{0,87}}$

Fonte: Autor (2019)

A taxa de falhas (Figura 42) obtida na análise se mostrou decrescente, comportamento característico de um equipamento em fase de mortalidade infantil.

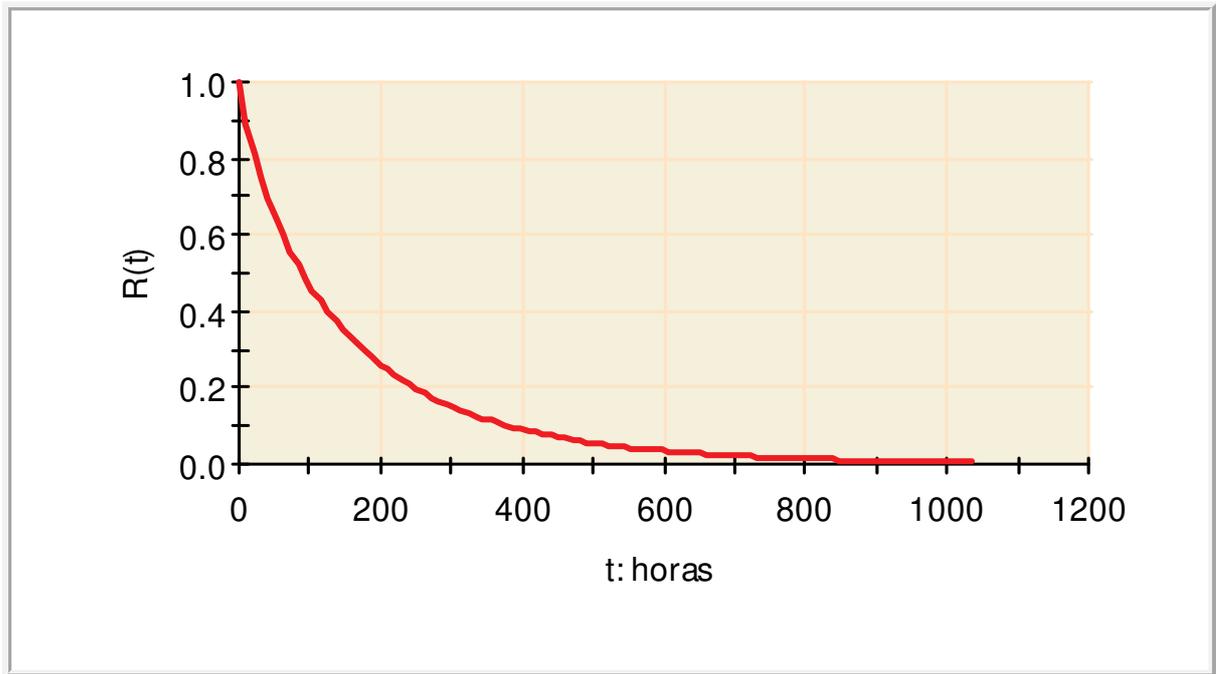
Figura 42 - Taxa de falhas SH-CO-004



Fonte: *ProConf* (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 43) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 43 - Função de confiabilidade SH-CO-004



Fonte: *ProConf* (2019)

#### 4.13 Corte: SH-CO-005

A Tabela 51 e Tabela 52 apresentam os dados de *TBF* e *TTR*, respectivamente, em horas obtidos do *software* de gestão de manutenção da empresa.

Tabela 51 - TBF de SH-CO-005

TBF SH-CO-005			
81	81	9	1125
9	9	369	747
90	243	261	117
108	36	126	
1422	603	18	

Fonte: Autor (2019)

Tabela 52 - TTR de SH-CO-005

TTR SH-CO-005			
0,37	5,05	5,02	0,38
16,17	0,02	2,48	0,50
1,12	0,48	1,02	15,60
0,32	7,27	1,22	3,57
2,87	0,63	27,67	0,67

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 53 são apresentados os resultados dos testes analíticos para cada um dos modelos de distribuição aplicados aos dados de *TBF*. O modelo *Weibull* não foi rejeitado pelo *ProConf*, então foi definido para essa análise. Para os dados de *TTR*, foi ajustado o modelo lognormal.

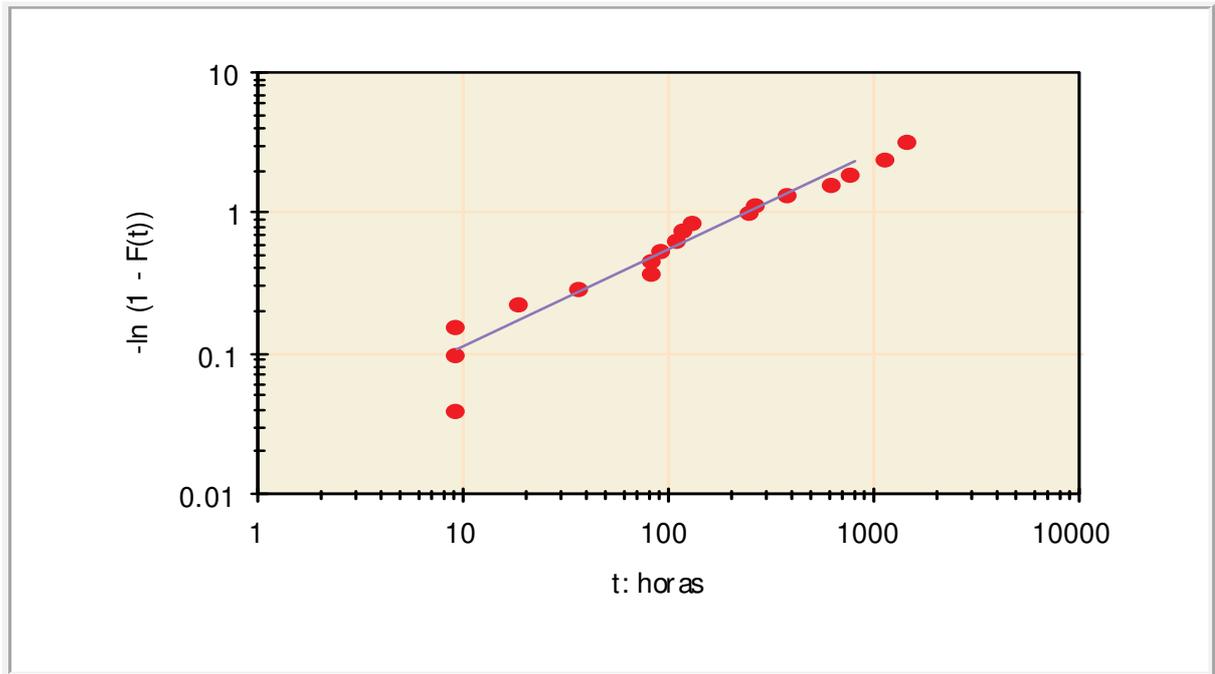
Tabela 53 - Ajustes da distribuição da amostra da SH-CO-005

Teste	Teste Qui-quadrado	Nível de significância	Teste KS	Nível de significância	Rejeitada
Exponencial	4,33	0,2282	0,2709	0,0011	Sim
Weibull	1,87	0,3918	0,1227	0,2810	Não

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 44 está a representação do papel da probabilidade correspondente a distribuição escolhida. Gráficamente o ajuste da linha aos pontos da amostra são aceitáveis e confirmam a escolha.

Figura 44 - Papel de probabilidade exponencial da amostra da SH-CO-005



Fonte: *ProConf* (2019)

O modelo de máxima verossimilhança encontrado é apresentado na Tabela 54 e as análises referente a amostra são apresentadas na sequência.

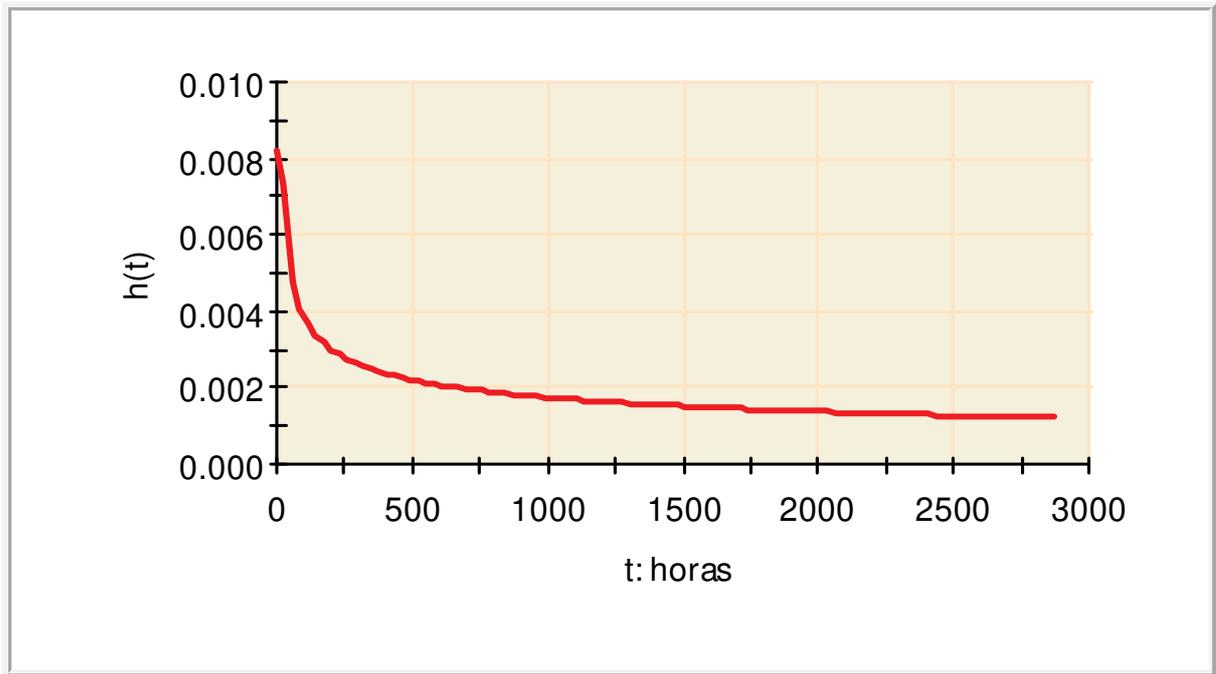
Tabela 54 - Modelo de máxima verossimilhança para SH-CO-005

Parâmetro	Valor modelado
Modelo de distribuição TBF	Weibull
Modelo de distribuição TTR	Lognormal
Fator de localização $t_0$	0
Fator de forma mais provável	0,7165
Intervalo de confiança para o fator de forma	0,408 até 0,878
Fator de escala mais provável	242,423 horas
Intervalo de confiança para o fator de escala	95,69 até 504,81
Nível de significância pelo teste $\chi^2$	39,18%
Nível de significância pelo teste $K-S$	28,10%
<i>MTBF</i>	309,58 horas
<i>MTTR</i>	6,08 horas
<i>AV</i>	98,07%
<i>R(t)</i>	$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{242,42}\right)^{0,72}}$

Fonte: Autor (2019)

A taxa de falhas (Figura 45) obtida na análise se mostrou decrescente, comportamento característico de um equipamento em fase de mortalidade infantil.

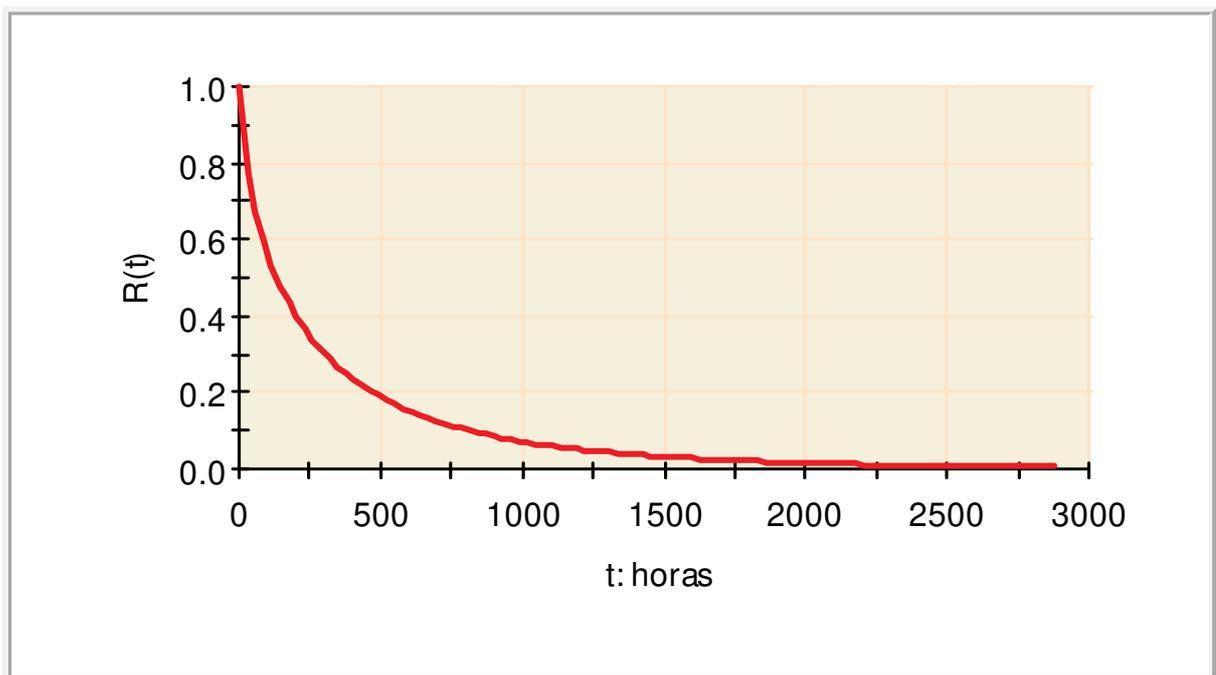
Figura 45 - Taxa de falhas SH-CO-005



Fonte: *ProConf* (2019)

Observa-se que a função de confiabilidade (Figura 46) é decrescente com o tempo, já que as probabilidades de perfeita execução decaem conforme ocorre a utilização e desgaste do equipamento.

Figura 46 - Função de confiabilidade SH-CO-005

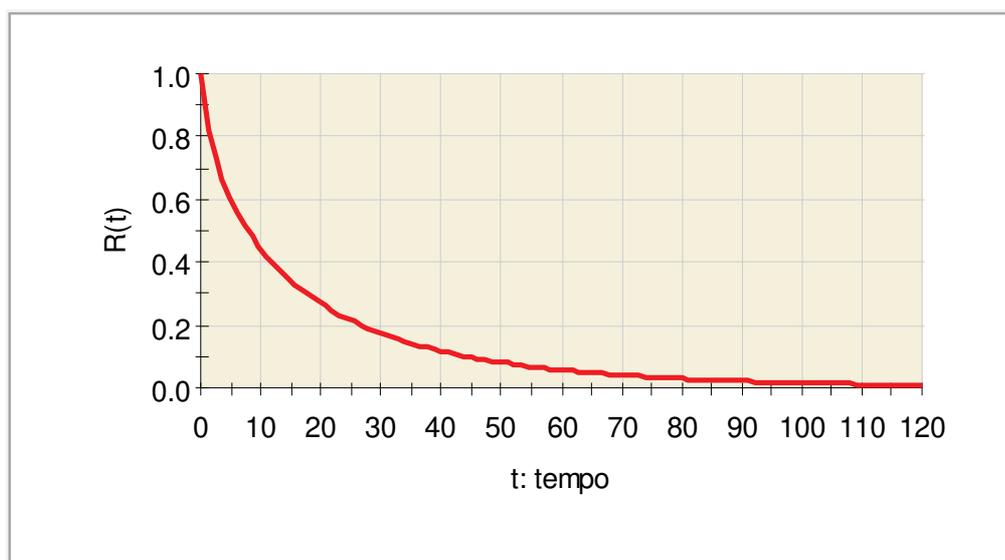


Fonte: *ProConf* (2019)

#### 4.14 Sistema produtivo: forjamento

Dadas as diferentes distribuições possíveis, nem sempre se consegue uma expressão analítica para a  $R_s(t)$ . O software *ProSys* resolve a equação de confiabilidade do sistema em série por métodos numéricos. A Figura 47 apresenta a solução dada pelo *ProSys*.

Figura 47 -  $R(t)$  para o sistema produtivo em série



Fonte: *ProSis* (2019)

Com dados simulados de  $R_s(t)$ , foi usado o software *CurveExpert* para fazer uma regressão linear. A melhor solução foi o modelo de Bleasdale, com  $R^2$  superior a 98%. A equação 21 apresenta o melhor modelo ajustado pelo *CurveExpert* aos dados simulados de  $R(t)$ .

$$R_s(t) = (1,052 + 0,0167t)^{-\left[\frac{1}{0,251}\right]} \quad (21)$$

A equação 21 não possui significado físico conhecido. É apenas um modelo matemático que ajustou com boa qualidade os dados obtidos por simulação. Usou-se este modelo para um cálculo alternativo de *MTBF*. O mesmo procedimento de integração por partes, com  $\Delta t = 0,01$  hora, resultou em  $MTBF = 17,21$  horas. Os dois cálculos diferem em menos de 3%.

Passa-se à análise da disponibilidade sistêmica para as máquinas em série.

A disponibilidade *AV* é uma probabilidade e o sistema é composto por cinco máquinas em série cujas *AV* são independentes. Portanto, a disponibilidade sistêmica *AVs* é a probabilidade que todas as cinco máquinas estejam disponíveis no instante

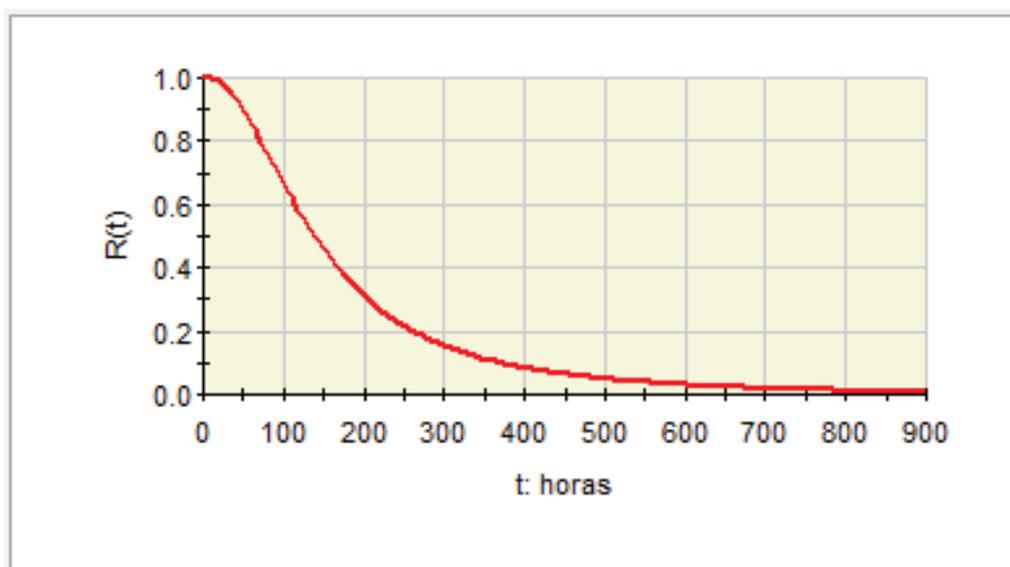
em que o sistema de produção seja requisitado. Esta probabilidade é a interseção das cinco  $AV_i$  e é dada por seu produtório. Logo,  $AVs = 93,6\%$ .

#### 4.15 Sistema produtivo: corte

Dadas as diferentes distribuições possíveis, nem sempre se consegue uma expressão analítica para a  $Rs(t)$ . O software *ProSis* resolve a equação 19 por métodos numéricos. Neste caso, como as máquinas podem cortar diâmetros diferentes de aço, a confiabilidade do sistema será calculada conforme o diâmetro da matéria prima a ser processada.

Para corte de barras redondas de aço até  $\varnothing 25,4$  mm, pode-se utilizar três máquinas em paralelo, PC-CO-001, 003 e 004. A Figura 48 apresenta a solução dada pelo *ProSis*.

Figura 48 -  $R(t)$  para o sistema produtivo em paralelo até  $\varnothing 25,4$ mm



Fonte: *ProSis* (2019)

Com dados simulados de  $Rs(t)$ , foi usado o *EXCEL* para fazer uma regressão não-linear. A melhor solução foi o modelo de exponencial, com  $R^2$  superior a 99%. A equação 22 apresenta o melhor modelo ajustado aos dados simulados de  $R(t)$ .

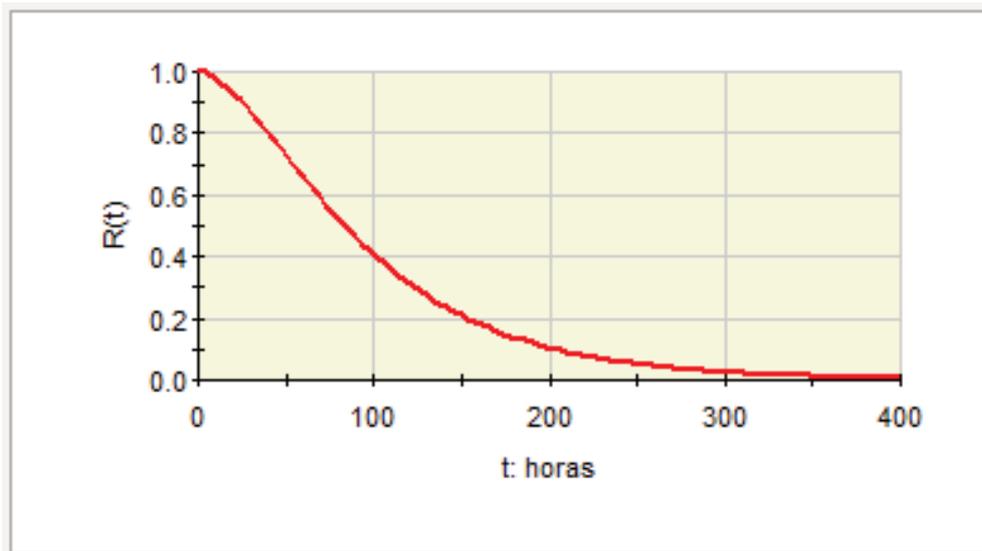
$$Rs(t) = 0,9741e^{-0,006t} \quad (22)$$

A equação 22 não possui significado físico conhecido. É apenas um modelo matemático que ajustou com boa qualidade os dados obtidos por simulação. Usou-se

este modelo para um cálculo alternativo de *MTBF*. Aplicando o procedimento de integração por partes, com  $\Delta t = 1$  hora, resultou em  $MTBF = 161,13$  horas.

Para corte de barras redondas de aço de  $\varnothing 26$  mm até  $\varnothing 34$  mm, pode-se utilizar duas máquinas em paralelo, PC-CO-003 e 004. A Figura 49 apresenta a solução dada pelo *ProSis*.

Figura 49 -  $R(t)$  para o sistema produtivo em paralelo de  $\varnothing 26$ mm até  $\varnothing 34$ mm



Fonte: *ProSis* (2019)

Com dados simulados de  $R_s(t)$ , foi usado o *EXCEL* para fazer uma regressão não-linear. A melhor solução foi o modelo de exponencial, com  $R^2$  superior a 99%. A equação 23 apresenta o melhor modelo ajustado aos dados simulados de  $R(t)$ .

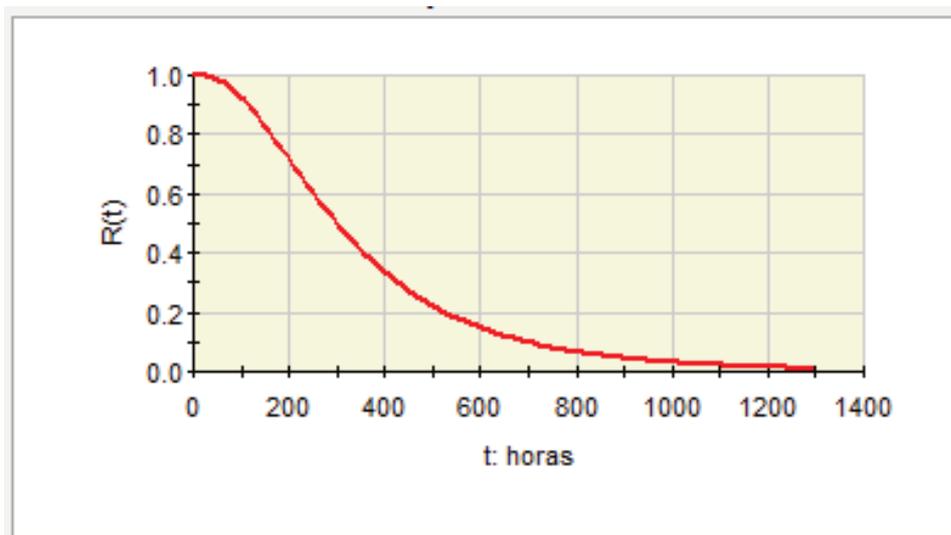
$$R_s(t) = 1,4508e^{-0,014t} \quad (23)$$

A equação 23 não possui significado físico conhecido. É apenas um modelo matemático que ajustou com boa qualidade os dados obtidos por simulação. Usou-se este modelo para um cálculo alternativo de *MTBF*. Aplicando o procedimento de integração por partes, com  $\Delta t = 1$  hora, resultou em  $MTBF = 102,52$  horas.

Para corte de barras redondas de aço de  $\varnothing 35$  mm até  $\varnothing 63$  mm, pode-se utilizar apenas a prensa de corte, PC-CO-004. Neste caso a curva de confiabilidade e a equação de confiabilidade da máquina já foram obtidas, bem como o valor de *MTBF*. Todos os dados obtidos estão na Tabela 34.

Para corte de barras redondas de aço de  $\varnothing 64$  mm até  $\varnothing 120$  mm, pode-se utilizar três máquinas em paralelo, SH-CO-001, 002 e 003. A Figura 50 apresenta a solução dada pelo *ProSis*.

Figura 50 -  $R(t)$  para o sistema produtivo em paralelo de  $\varnothing 64\text{mm}$  até  $\varnothing 120\text{mm}$



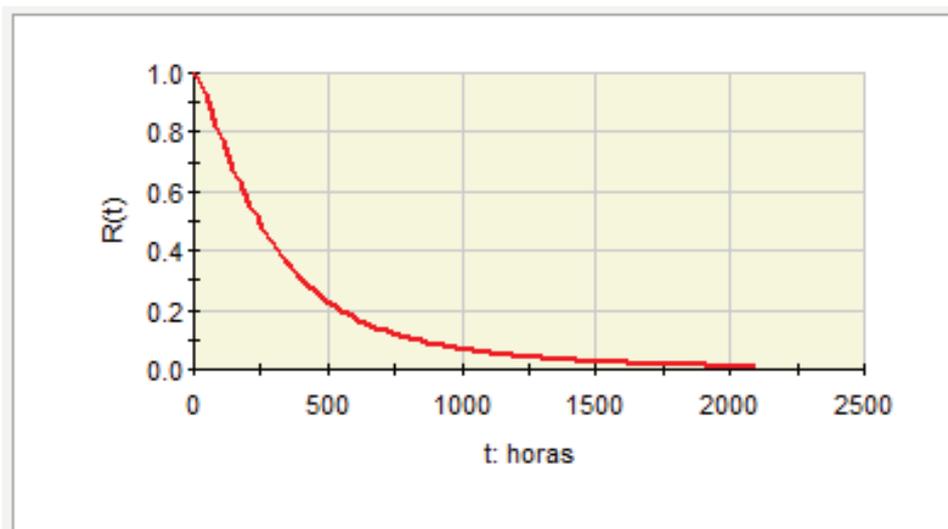
Fonte: *ProSis* (2019)

Com dados simulados de  $R_s(t)$ , foi usado o *EXCEL* para fazer uma regressão não-linear. A melhor solução foi o modelo de exponencial, com  $R^2$  superior a 99%. A equação 24 apresenta o melhor modelo ajustado aos dados simulados de  $R(t)$ .

$$R_s(t) = 1,4229e^{-0,004t} \quad (24)$$

A equação 24 não possui significado físico conhecido. É apenas um modelo matemático que ajustou com boa qualidade os dados obtidos por simulação. Usou-se este modelo para um cálculo alternativo de *MTBF*. Aplicando o procedimento de integração por partes, com  $\Delta t = 1$  hora, resultou em  $MTBF = 353,05$  horas.

Para corte de perfis de alumínio, pode-se utilizar duas máquinas em paralelo, SH-CO-004 e 005. A Figura 51 apresenta a solução dada pelo *ProSis*.

Figura 51 -  $R(t)$  para o sistema produtivo em paralelo de perfis

Fonte: ProSis (2019)

Com dados simulados de  $R_s(t)$ , foi usado o *EXCEL* para fazer uma regressão não-linear. A melhor solução foi o modelo de exponencial, com  $R^2$  superior a 98%. A equação 25 apresenta o melhor modelo ajustado aos dados simulados de  $R(t)$ .

$$R_s(t) = 0,7389e^{-0,002t} \quad (25)$$

A equação 25 não possui significado físico conhecido. É apenas um modelo matemático que ajustou com boa qualidade os dados obtidos por simulação. Usou-se este modelo para um cálculo alternativo de *MTBF*. Aplicando o procedimento de integração por partes, com  $\Delta t = 1$  hora, resultou em  $MTBF = 363,81$  horas.

Passa-se à análise da disponibilidade sistêmica para as máquinas em paralelo.

A disponibilidade  $AV$  é uma probabilidade e o sistema é composto oito máquinas em paralelo cujas  $AV$  são independentes. Portanto, a disponibilidade sistêmica  $AV_s$  é a probabilidade que todas as oito máquinas estejam disponíveis no instante em que o sistema de produção seja requisitado. Esta probabilidade, será calculada conforme foi a confiabilidade do sistema, ou seja, conforme o diâmetro da matéria prima a ser processada.

A medida, para as máquinas que cortam barras de aço até  $\varnothing 25,4$  mm é a interseção das três  $AV_i$  e é dada por seu produtório. Logo,  $AV_s = 92,76\%$ . Para o arranjo de máquinas que cortam barras de aço de  $\varnothing 25,4$  mm até  $\varnothing 34$  mm, a interseção das duas  $AV_i$ , a  $AV_s = 94,39\%$ . Para o corte barras de aço de  $\varnothing 35$  mm até  $\varnothing 63$  mm, a disponibilidade é a de uma máquina apenas,  $AV_s = 96,83\%$ . Para o arranjo de máquinas que cortam barras de aço de  $\varnothing 64$  mm até  $\varnothing 120$  mm, a

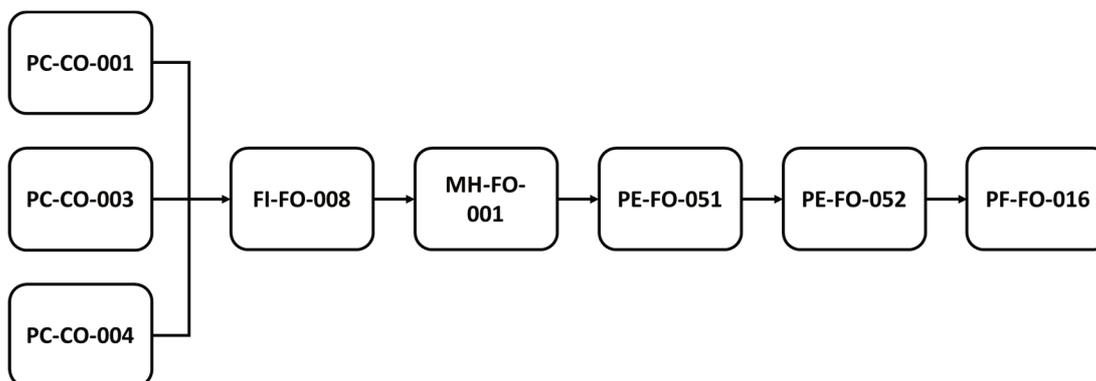
disponibilidade é a interseção das três  $AV_i$ ,  $AVs = 95,68\%$ . Para o arranjo de máquinas que cortam perfis de alumínio a disponibilidade é a interseção das duas  $AV_i$ ,  $AVs = 93,94\%$ .

#### 4.16 Sistema produtivo completo

Aqui são apresentadas as análises de confiabilidade do sistema completo, setor de corte de matéria prima e linha de forjamento, ou seja, uma combinação em série do arranjo em paralelo com o arranjo em série. Assim como para o setor de corte de matéria prima, as análises serão realizadas para os arranjos formados conforme o diâmetro do material a ser processado.

Para o corte e forjamento de peças, cuja matéria prima possui diâmetro de até 25,4 mm, são consideradas três máquinas em paralelo no setor de corte e as cinco máquinas em série no forjamento, Figura 52.

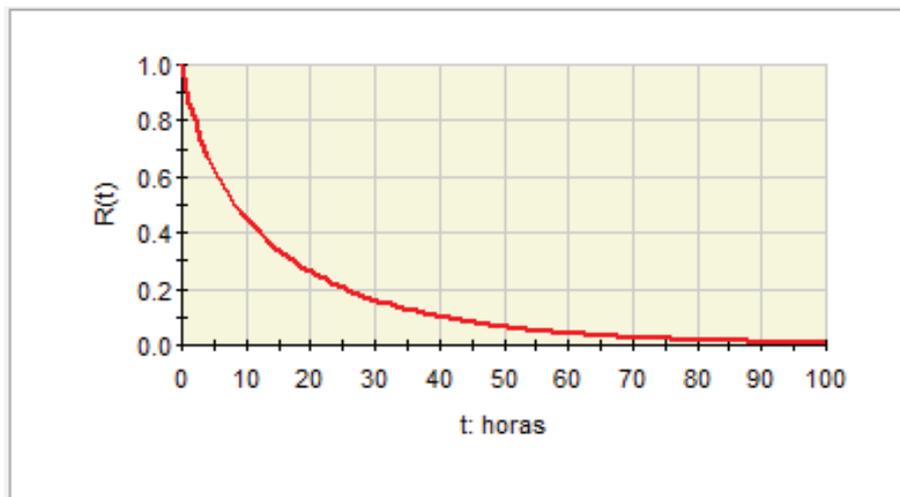
Figura 52 - Diagrama de blocos sistema produtivo completo até  $\varnothing 25,4\text{mm}$



Fonte:

Autor (2019)

A Figura 53 apresenta a solução dada, para a confiabilidade do arranjo, pelo *ProSis*.

Figura 53 -  $R(t)$  para o sistema produtivo completo até Ø25,4mm

Fonte: ProSis (2019)

Com dados simulados de  $R_s(t)$ , foi usado o *EXCEL* para fazer uma regressão não-linear. A melhor solução foi o modelo de exponencial, com  $R^2$  superior a 99%. A equação 26 apresenta o melhor modelo ajustado aos dados simulados de  $R(t)$ .

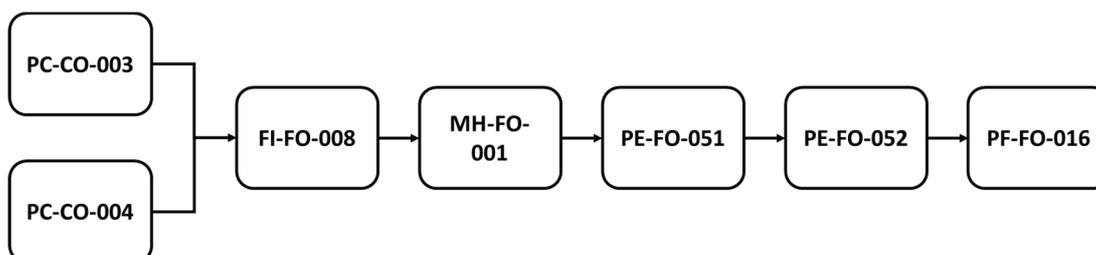
$$R_s(t) = 0,6807e^{-0,046t} \quad (26)$$

A equação 26 não possui significado físico conhecido. É apenas um modelo matemático que ajustou com boa qualidade os dados obtidos por simulação. Usou-se este modelo para um cálculo alternativo de *MTBF*. Aplicando o procedimento de integração por partes, com  $\Delta t = 1$  hora, resultou em  $MTBF = 14,31$  horas.

A disponibilidade para esse arranjo é a interseção das oito  $AV_i$  e é dada por seu produtório. Logo,  $AVs = 86,82\%$ .

Para o corte e forjamento de peças, cuja matéria prima possui diâmetro de Ø 26 mm até Ø 34 mm, são consideradas duas máquinas em paralelo no setor de corte e as cinco máquinas em série no forjamento, Figura 54.

Figura 54 - Diagrama de blocos sistema produtivo completo de Ø26 até Ø34mm

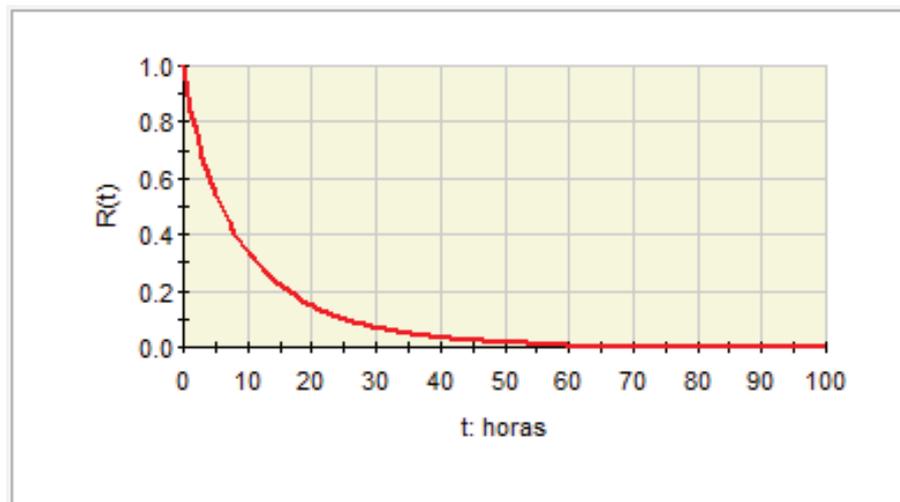


Fonte:

Autor (2019)

A Figura 55 apresenta a solução dada, para a confiabilidade do arranjo, pelo *ProSis*.

Figura 55 -  $R(t)$  para o sistema produtivo completo de Ø26 até Ø34mm



Fonte: *ProSis* (2019)

Com dados simulados de  $R_s(t)$ , foi usado o *EXCEL* para fazer uma regressão não-linear. A melhor solução foi o modelo de exponencial, com  $R^2$  superior a 99%. A equação 27 apresenta o melhor modelo ajustado aos dados simulados de  $R(t)$ .

$$R_s(t) = 0,7258e^{-0,077t} \quad (27)$$

A equação 27 não possui significado físico conhecido. É apenas um modelo matemático que ajustou com boa qualidade os dados obtidos por simulação. Usou-se este modelo para um cálculo alternativo de *MTBF*. Aplicando o procedimento de integração por partes, com  $\Delta t = 1$  hora, resultou em  $MTBF = 9,06$  horas.

A disponibilidade para esse arranjo é a interseção das sete *AV<sub>i</sub>* e é dada por seu produtório. Logo,  $AV_s = 88,34\%$ .

Para o corte e forjamento de peças, cuja matéria prima possui diâmetro de Ø 35 mm até Ø 63 mm, são consideradas duas máquinas em paralelo no setor de corte e as cinco máquinas em série no forjamento, Figura 56.

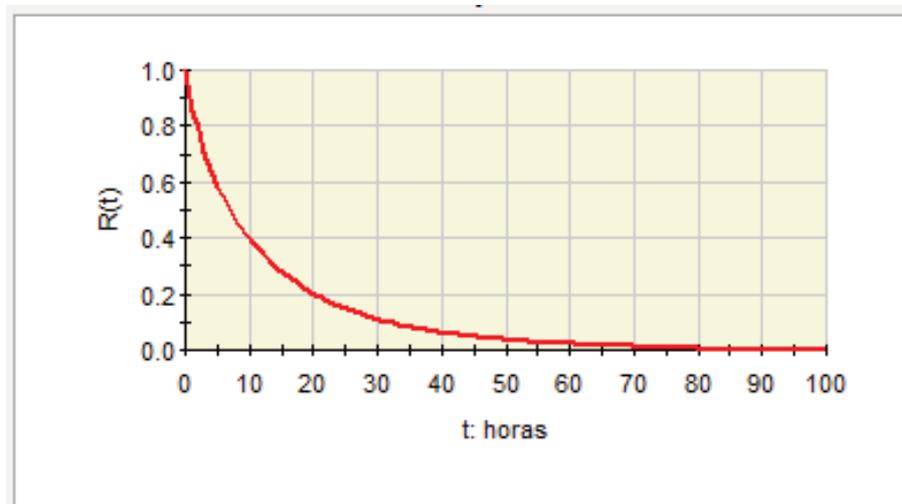
Figura 56 - Diagrama de blocos sistema produtivo completo de Ø35 até Ø63mm



Fonte: Autor (2019)

A Figura 57 apresenta a solução dada, para a confiabilidade do arranjo, pelo *ProSis*.

Figura 57 -  $R(t)$  para o sistema produtivo completo de Ø35 até Ø63mm



Fonte: *ProSis* (2019)

Com dados simulados de  $R_s(t)$ , foi usado o *EXCEL* para fazer uma regressão não-linear. A melhor solução foi o modelo de exponencial, com  $R^2$  superior a 99%. A equação 28 apresenta o melhor modelo ajustado aos dados simulados de  $R(t)$ .

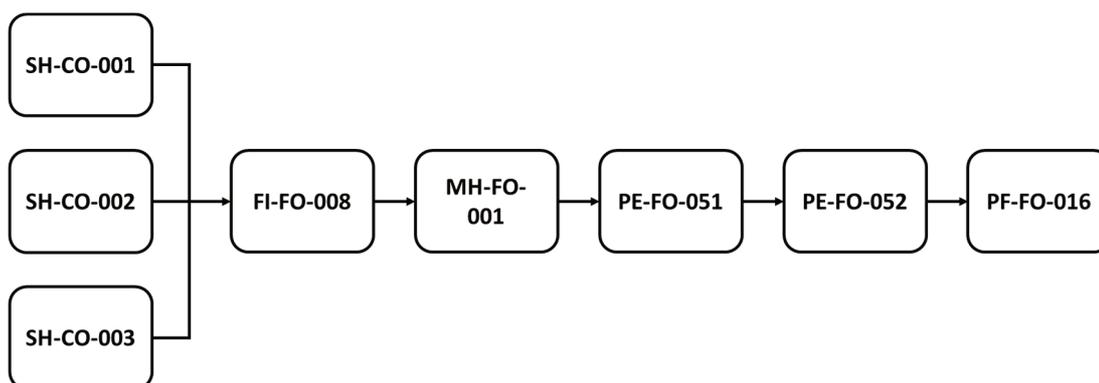
$$R_s(t) = 0,6767e^{-0,058t} \quad (28)$$

A equação 28 não possui significado físico conhecido. É apenas um modelo matemático que ajustou com boa qualidade os dados obtidos por simulação. Usou-se este modelo para um cálculo alternativo de *MTBF*. Aplicando o procedimento de integração por partes, com  $\Delta t = 1$  hora, resultou em  $MTBF = 11,29$  horas.

A disponibilidade para esse arranjo é a interseção das sete  $AV_i$  e é dada por seu produtório. Logo,  $AV_s = 90,63\%$ .

Para o corte e forjamento de peças, cuja matéria prima possui diâmetro de Ø 64 mm até Ø 120 mm, são consideradas três máquinas em paralelo no setor de corte e as cinco máquinas em série no forjamento, Figura 58.

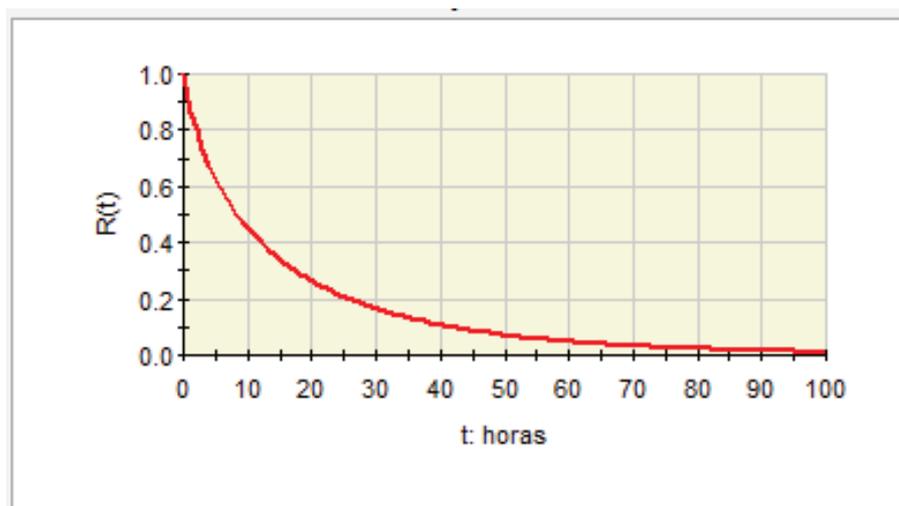
Figura 58 - Diagrama de blocos sistema produtivo completo de Ø64 até Ø120mm



Fonte: Autor (2019)

A Figura 59 apresenta a solução dada, para a confiabilidade do arranjo, pelo *ProSis*.

Figura 59 -  $R(t)$  para o sistema produtivo completo de Ø64 até Ø120mm



Fonte: *ProSis* (2019)

Com dados simulados de  $R_s(t)$ , foi usado o *EXCEL* para fazer uma regressão não-linear. A melhor solução foi o modelo de exponencial, com  $R^2$  superior a 99%. A equação 29 apresenta o melhor modelo ajustado aos dados simulados de  $R(t)$ .

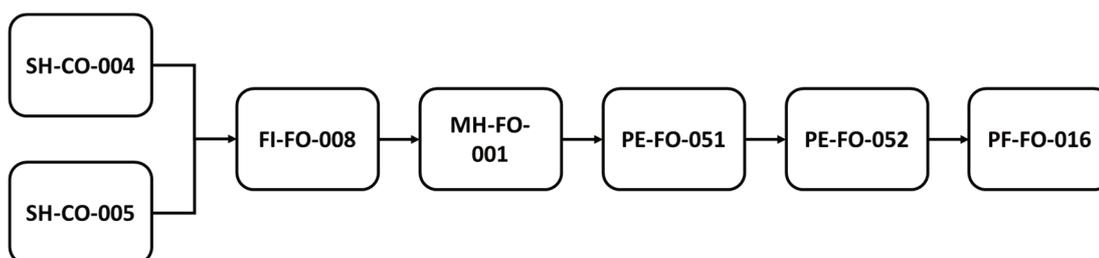
$$R_s(t) = 0,6272e^{-0,042t} \quad (29)$$

A equação 29 não possui significado físico conhecido. É apenas um modelo matemático que ajustou com boa qualidade os dados obtidos por simulação. Usou-se este modelo para um cálculo alternativo de *MTBF*. Aplicando o procedimento de integração por partes, com  $\Delta t = 1$  hora, resultou em  $MTBF = 14,39$  horas.

A disponibilidade para esse arranjo é a interseção das sete  $AV_i$  e é dada por seu produtório. Logo,  $AVs = 89,56\%$ .

Para o corte e forjamento de peças, cuja matéria prima é um perfil de alumínio, são consideradas duas máquinas em paralelo no setor de corte e as cinco máquinas em série no forjamento, Figura 60.

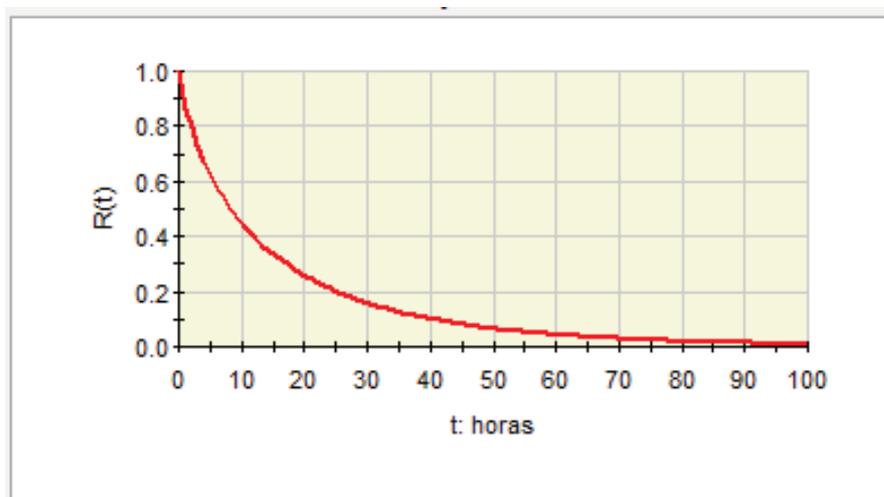
Figura 60 - Diagrama de blocos sistema produtivo completo de perfis



Fonte: Autor (2019)

A Figura 61 apresenta a solução dada, para a confiabilidade do arranjo, pelo *ProSis*.

Figura 61 -  $R(t)$  para o sistema produtivo completo de perfis



Fonte: *ProSis* (2019)

Com dados simulados de  $R_s(t)$ , foi usado o *EXCEL* para fazer uma regressão não-linear. A melhor solução foi o modelo de exponencial, com  $R^2$  superior a 99%. A equação 30 apresenta o melhor modelo ajustado aos dados simulados de  $R(t)$ .

$$R_s(t) = 0,6480e^{-0,044t} \quad (30)$$

A equação 30 não possui significado físico conhecido. É apenas um modelo matemático que ajustou com boa qualidade os dados obtidos por simulação. Usou-se

este modelo para um cálculo alternativo de *MTBF*. Aplicando o procedimento de integração por partes, com  $\Delta t = 1$  hora, resultou em  $MTBF = 14,22$  horas.

A disponibilidade para esse arranjo é a interseção das sete  $AV_i$  e é dada por seu produtório. Logo,  $AVs = 88,05\%$ .

#### 4.17 Estratégia de manutenção para as máquinas

A estratégia de manutenção de um equipamento pode ser derivada do comportamento da taxa de falhas  $\lambda(t)$ .

Se  $\lambda(t)$  tiver comportamento decrescente, a distribuição de Weibull que ajusta os *TBF* tem fator de forma  $\gamma < 1$ . Neste caso, a quantidade de falhas por unidade de tempo decresce, o que significa que as falhas iniciais no equipamento ainda não foram totalmente corrigidas: estão em processo de correção. Se falhas iniciais ainda existem, a melhor estratégia é a manutenção corretiva: dado que uma falha ocorreu, o melhor procedimento é aproveitar esta falha para corrigir o processo que a ocasionou (MONTE; ALMEIDA FILHO, 2015). Usualmente, tal investigação requer tempo e disponibilidade de máquina para testes e eventuais reformas. Caso não haja redundância de equipamento nem seja possível antecipar produção para estoque, a alternativa é adotar a manutenção de emergência: troca imediata de peças quebradas por peças idênticas e início de um processo de engenharia de manutenção para identificar as causas mais prováveis das falhas e corrigi-las logo que seja possível (SELLITTO, 2005). Esta estratégia de manutenção é indicada para as três primeiras máquinas da linha de forjamento, FI-FO-008, MH-FO-001 e PE-FO-051, e para três máquinas do setor de corte de matéria prima, PC-CO-001, SH-CO-004 e SH-CO-005. Exemplos de aplicação deste tipo de estratégia surgem em Araújo et al. (2011), Monte e Almeida Filho (2015), e Sellitto e Brusius Jr. (2017).

A não adoção desta estratégia implica riscos. Caso se faça apenas a troca de peças, sem correção das falhas, o equipamento possivelmente não sairá da mortalidade infantil, pois as falhas se repetirão. Caso se opte pela manutenção preventiva, que troca peças antes da falha, as peças que serão trocadas serão exatamente as peças fortes, que não quebraram e que possivelmente não quebrarão. Caso a peça substituta seja igual ou mais forte do que a peça que sai, nada acontecerá, pois, a peça que saiu já era forte. Porém, se a peça que entra é mais

frágil, um defeito surgirá onde antes não havia, fazendo o equipamento recuar na curva da banheira e perpetuando a fase de mortalidade infantil.

Se  $\lambda(t)$  tiver comportamento constante, a distribuição de Weibull que ajusta os TBF tem fator de forma  $\gamma = 1$ , recaindo na distribuição exponencial. Neste caso, a quantidade de falhas por unidade de tempo é constante e devido a causas aleatórias que surgem fora do equipamento: não há mais falhas iniciais e ainda não há falhas por desgaste. A melhor estratégia é a manutenção preditiva: monitorar pontos cruciais do equipamento para garantir que a fase de desgaste ainda não tenha se iniciado. Este monitoramento pode ser feito por diversas técnicas, tais como medição de vibrações, medição de parâmetros elétricos em motores e acionamentos, ferrografia, termografia, ou simplesmente por inspeções periódicas baseadas em check-lists. Adicionalmente, boas práticas de gestão de equipamento, tais como a MPT (Manutenção Produtiva Total), podem ser úteis, pois reduzem as falhas aleatórias ao organizar o ambiente de trabalho (CARNERA, 2005; HASHEMIAN; BEAN, 2011). Esta estratégia é indicada para as duas últimas máquinas da linha de forjamento, PE-FO-052 e PF-FO-016 e para cinco máquinas do setor de corte de matéria prima, PC-CO-003, PC-CO-004, SH-CO-001, SH-CO-002 e SH-CO-003. Exemplos de aplicação deste tipo de estratégia surgem em Castro et al. (2016), Ferreira et al. (2015), e Sellitto e Brusius Jr (2017).

A adoção de uma estratégia de manutenção preventiva nestes casos também implica riscos. Caso se troquem peças que ainda não falharam e a peça que entre seja mais fraca do que a que sai, um defeito surgirá onde antes não havia. O equipamento recua na curva da banheira e pode voltar à fase de mortalidade infantil.

A estratégia de manutenção preventiva não se aplica a nenhuma das máquinas estudadas. Nesta estratégia, dado que a taxa de falhas é crescente ( $\gamma > 1$ ), uma peça que ainda não falhou, falhará inevitavelmente em um momento futuro. Neste caso, para evitar paradas inesperadas, por cálculos de probabilidade ou por modelos matemáticos define-se o melhor momento para a troca incondicional das peças frágeis. A não adoção desta estratégia em equipamentos que se encontrem na fase de mortalidade senil implica paradas não planejadas e possibilidade de não cumprimento de datas devidas em ordens de produção.

## 5 MODELAGEM QUALITATIVA

Optou-se por aplicar o FMEA apenas nas máquinas da linha de forja, o principal sistema produtivo da empresa estudada. A partir dessa escolha, identificou-se a máquina gargalo da linha: o martelo MH-FO-001. Além dessa máquina, se estendeu a aplicação do FMEA ao forno de indução, FI-FO-008, uma máquina indispensável para o processo e que não possui *backup*.

### 5.1 Gargalo da linha de forjamento

O apêndice a – tempos de processamento de máquina por item apresenta os tempos de processamento para cada uma das máquinas considerando cada item produzido na linha de forjamento no ano de 2017. Na tabela estão, todos os itens produzidos no ano, a quantidade de golpes realizados por cada máquina conforme cada item, o tempo de golpe para cada máquina (cronometrado durante a produção) e o tempo total de processamento de cada item, em segundos e horas.

Conforme os dados de apontamento realizados pelo setor de produção durante o ano de 2017, foram identificadas todas as peças produzidas em cada mês, a quantidade total, além das horas apontadas, produtivas e improdutivas. Esses dados são apresentados no Apêndice b - quantidade de itens produzidos e horas apontadas.

Com a combinação dos dados apresentados acima se obtém a demanda mensal por máquina de cada item, ou seja, a quantidade de peças de um determinado item, produzida em um mês, multiplicada pelo tempo de processamento deste item na máquina. As demandas obtidas são apresentadas no Apêndice c - Demanda mensal por máquina de cada item. Então, a partir desses dados, soma-se as quantidades de horas para se obter o total de horas demandadas para cada máquina em cada mês do ano (Tabela 55).

Tabela 55 – Demanda total por máquina em horas no mês

	<b>FI-FO-008</b>	<b>MH-FO-001</b>	<b>PE-FO-051</b>	<b>PE-FO-052</b>	<b>PF-FO-016</b>
Janeiro	29,7604	42,6507	17,1487	14,1479	14,1474
Fevereiro	91,2447	133,9586	57,2133	47,5758	46,3696
Março	76,6537	125,9978	55,5565	47,1950	37,8341
Abril	60,6668	91,4151	39,0873	31,8447	29,6617
Maio	145,1604	177,6401	74,1900	67,1535	70,4468
Junho	91,4915	142,5009	60,2102	50,1443	45,0100
Julho	107,4916	111,9041	45,8643	41,1502	48,7129
Agosto	51,9834	106,4922	34,3535	21,5510	24,2159
Setembro	37,3017	62,9246	20,5559	15,3118	16,4834
Outubro	52,5075	97,9308	33,7337	21,6774	25,6613
Novembro	55,1340	58,8224	24,5881	21,6697	25,6522
Dezembro	38,8437	42,6698	15,8699	14,3683	17,0090

Fonte: Autor (2019)

A partir da equação 22, obteve-se o índice de rendimento operacional global dos equipamentos (IROG), que são apresentados na Tabela 56.

Tabela 56 - IROG por máquina no mês

	<b>FI-FO-008</b>	<b>MH-FO-001</b>	<b>PE=FO-051</b>	<b>PE-FO-052</b>	<b>PF-FO-016</b>
Janeiro	0,2165	0,3103	0,1248	0,1029	0,1029
Fevereiro	0,2736	0,4017	0,1716	0,1427	0,1390
Março	0,1985	0,3262	0,1438	0,1222	0,0980
Abril	0,2321	0,3497	0,1495	0,1218	0,1135
Maio	0,3362	0,4115	0,1718	0,1555	0,1632
Junho	0,2541	0,3957	0,1672	0,1392	0,1250
Julho	0,3583	0,3730	0,1529	0,1372	0,1624
Agosto	0,1663	0,3407	0,1099	0,0689	0,0775
Setembro	0,1993	0,3362	0,1098	0,0818	0,0881
Outubro	0,1993	0,3717	0,1280	0,0823	0,0974
Novembro	0,2717	0,2899	0,1212	0,1068	0,1264
Dezembro	0,2512	0,2760	0,1026	0,0929	0,1100

Fonte: Autor (2019)

A capacidade nominal das máquinas foi definida como a quantidade de dias úteis em cada mês no ano de 2017. Foi considerado 10 horas de trabalho para cada dia útil. Além disso, foi considerada a disponibilidade calculada para cada equipamento, multiplicando-as pelas horas disponíveis por mês. A capacidade de cada máquina em cada mês do ano de 2017 está na Tabela 57.

Tabela 57 - Capacidade nominal de cada máquina por mês em horas

MÊS	DIAS ÚTEIS	HORAS	FI-FO-008	MH-FO-001	PE-FO-051	PE-FO-052	PF-FO-016
			98,23%	96,52%	99,74%	99,58%	98,27%
Janeiro	22	220	216,106	212,344	219,428	219,076	216,194
Fevereiro	19	190	186,637	183,388	189,506	189,202	186,713
Março	23	230	225,929	221,996	229,402	229,034	226,021
Abril	18	180	176,814	173,736	179,532	179,244	176,886
Mai	22	220	216,106	212,344	219,428	219,076	216,194
Junho	22	220	216,106	212,344	219,428	219,076	216,194
Julho	21	210	206,283	202,692	209,454	209,118	206,367
Agosto	23	230	225,929	221,996	229,402	229,034	226,021
Setembro	20	200	196,46	193,04	199,48	199,16	196,54
Outubro	21	210	206,283	202,692	209,454	209,118	206,367
Novembro	20	200	196,46	193,04	199,48	199,16	196,54
Dezembro	20	200	196,46	193,04	199,48	199,16	196,54

Fonte: Autor (2019)

Considerando a capacidade nominal dos equipamentos e seus respectivos IROG, obteve-se as capacidades reais dos equipamentos, que é o produto dessas duas variáveis. O resultado é apresentado na Tabela 58.

Tabela 58 - Capacidade real de cada máquina por mês em horas

	FI-FO-008	MH-FO-001	PE-FO-051	PE-FO-052	PF-FO-016
Janeiro	46,7895	65,8883	27,3757	22,5490	22,2517
Fevereiro	51,0648	73,6645	32,5115	26,9916	25,9612
Março	44,8396	72,4210	32,9981	27,9868	22,1406
Abril	41,0328	60,7536	26,8436	21,8346	20,0703
Mai	72,6631	87,3735	37,7082	34,0770	35,2780
Junho	54,9060	84,0291	36,6889	30,5062	27,0224
Julho	73,9074	75,6019	32,0194	28,6822	33,5069
Agosto	37,5719	75,6292	25,2113	15,7904	17,5096
Setembro	39,1583	64,9066	21,9108	16,2949	17,3109
Outubro	41,1127	75,3438	26,8191	17,2064	20,1007
Novembro	53,3814	55,9612	24,1725	21,2692	24,8469
Dezembro	49,3559	53,2737	20,4747	18,5078	21,6210

Fonte: Autor (2019)

Então, comparando a capacidade real de cada máquina com a demanda exigida para ela em cada mês, pode-se identificar qual máquina foi o gargalo em cada mês do ano de 2017. Na Tabela 59 são apresentados os valores da diferença temporal de cada máquina, ou seja, a diferença entre a capacidade real e a demanda total da

máquina no mês. Os menores valores em cada mês estão marcados em vermelho e representam a máquina gargalo naquele mês.

Tabela 59 - Diferença temporal em unidade de tempo

	<b>FI-FO-008</b>	<b>MH-FO-001</b>	<b>PE-FO-051</b>	<b>PE-FO-052</b>	<b>PF-FO-016</b>
Janeiro	17,0290	23,2376	10,2270	8,4012	<b>8,1043</b>
Fevereiro	-40,1799	<b>-60,2942</b>	-24,7019	-20,5842	-20,4084
Março	-31,8141	<b>-53,5768</b>	-22,5584	-19,2083	-15,6935
Abril	-19,6339	<b>-30,6615</b>	-12,2436	-10,0101	-9,5914
Maio	-72,4973	<b>-90,2666</b>	-36,4818	-33,0764	-35,1688
Junho	-36,5855	<b>-58,4718</b>	-23,5213	-19,6380	-17,9875
Julho	-33,5842	<b>-36,3022</b>	-13,8449	-12,4679	-15,2060
Agosto	-14,4115	<b>-30,8629</b>	-9,1422	-5,7605	-6,7063
Setembro	1,8566	1,9820	1,3548	0,9830	<b>0,8275</b>
Outubro	-11,3947	<b>-22,5870</b>	-6,9146	-4,4710	-5,5606
Novembro	-1,7526	<b>-2,8613</b>	-0,4156	-0,4005	-0,8053
Dezembro	10,5123	10,6039	4,6049	<b>4,1394</b>	4,6120

Fonte: Autor (2019)

Observa-se que o martelo hidráulico, MH-FO-001, foi a máquina gargalo em 75% dos meses do ano de 2017. Logo, para este trabalho, assume-se que essa máquina é o gargalo da linha de forjamento e deve ser considerada uma máquina crítica para o sistema produtivo. De mesmo modo, o forno de indução, FI-FO-008, será também considerada uma máquina crítica para o sistema produtivo, pelo fato de não possuir *backup* e ser indispensável para a produção da maioria das peças na linha de forjamento.

## 5.2 FMEA FI-FO-001

Serão destacados os modos de falha que apresentaram os maiores valores de risco, maiores que 150, e as ações de melhoria propostas para esses itens. As ações são validadas com a atualização do valor de risco, que deve ser menor que 150. O FMEA do forno à indução, FI-FO-008, é apresentado na Tabela 60.

Para a realização da análise dos modos de falha e efeito, o forno foi dividido em três partes principais, transformador, conversor e estação de aquecimento.

A primeira parte analisada foi o transformador, cuja função é rebaixar a tensão de alimentação para o forno. Foram identificados seis modos de falha: avaria por sobretensão, cujo efeito é uma avaria geral no equipamento, e é causada por

oscilação na rede de alimentação; avaria por sobrecorrente, cujo efeito é uma avaria geral no equipamento, e é causada por oscilação na rede de alimentação; mal contato nos conectores, cujo efeito é o superaquecimento do transformador, e é causado por vibrações, elétricas e mecânicas; intempéries, cujo efeito é o surgimento de arcos voltaicos, e é causada por falta de para-raios e infiltração no local de instalação do equipamento; óleo de refrigeração, cujo efeito é o superaquecimento do transformador, e é causado pela perda da capacidade dielétrica do óleo; e animais, cujo efeito é o surgimento de arcos voltaicos, causados pela falta de controle de pragas e o local de instalação do equipamento.

No transformador destacou-se o modo de falha referente ao óleo de refrigeração, cuja avaliação do risco ultrapassou o valor de 150 e resultou em 180. Isso ocorreu devido a um número maior atribuído a ocorrência, baseado no histórico de manutenção e na vivência da equipe na empresa. A ação de melhoria proposta foi de acrescentar um sistema de controle de temperatura do transformador, responsável por desligar o equipamento, ao detectar uma elevação de temperatura anormal, preservando o equipamento. A atividade foi designada ao técnico eletrônico. A nova avaliação resultou na diminuição da não-detecção, de 6 para 4, resultando num risco igual a 120.

O conversor tem a função de converter a tensão de alimentação, modulando a tensão e variando a frequência conforme a carga necessária. Foram identificados sete modos de falha: a porta, fusível ou rede abertas, cujo efeito é a perda da função do equipamento, e possui duas causas, o erro operacional e a sobretensão e/ou sobrecorrente na alimentação; falha na refrigeração, cujo efeito é o superaquecimento do equipamento, para esse modo quatro possíveis causas foram identificadas, falha na turbina, temperatura da água de entrada elevada, falta d'água e perda de carga do sistema de refrigeração; a sobretensão, cujo efeito é a perda da função do equipamento, e é causado por curto circuito na estação de aquecimento; a sobrecorrente, cujo efeito é a perda da função do equipamento, e é causado por curto circuito na estação de aquecimento; a falha na frequência, cujo efeito é a perda da função do equipamento, e é causado por avaria nos capacitores e/ou bobinas de aquecimento; umidade, cujo efeito é o surgimento de arcos voltaicos e é causado pelo vazamento de água de refrigeração das bobinas e/ou barramentos; e a falta de fase, cujo efeito é uma avaria no circuito do conversor, e é causado por falha em uma das fases da rede de alimentação.

No conversor destacou-se o modo de falha referente a refrigeração do conversor, cuja avaliação resultou em 192 para a causa relacionada a perda de carga. Isso ocorreu devido a um número maior atribuído a detecção dessa causa, cujo controle é apenas visual pelo operador, quando detecta um fluxo de água de refrigeração pequeno durante o SETUP da máquina. A ação de melhoria definida pela equipe foi de acrescentar um fluxostato, sensor que mede o fluxo de um fluido, no sistema de refrigeração do conversor, e que esse disparasse um alarme, na diminuição do fluxo, no painel de operação. A atividade foi designada ao técnico eletrônico. A nova avaliação resultou na diminuição da não-deteção, de 8 para 4, resultando num risco igual a 96.

A estação de aquecimento tem a função de aquecer a matéria prima por indução magnética. Foram identificados oito modos de falha: vazamento de óleo dielétrico dos capacitores, cujo efeito é a diminuição da função do equipamento, causado pelo superaquecimento do óleo; falha na refrigeração dos capacitores, cujos dois efeitos podem ser o surgimento de arco voltaico, causado pela alta temperatura da água de entrada, e sobrecorrente, causada pela falta d'água; umidade, cujos dois efeitos podem ser o surgimento de arco voltaico, causado por vazamentos de água nas espiras da bobina de indução, e sobrecorrente, causada pelo rompimento das mangueiras da água de refrigeração; mal contato nos barramentos internos, cujos dois efeitos podem ser o surgimento de arco voltaico, causado pela vibração e parafusos de fixação frouxos, e sobrecorrente, causada pelo excesso de óxido das matérias primas nos barramentos; falha na refrigeração da bobina de indução, cujo efeito é o superaquecimento das peças aquecidas, causado pelo entupimento das espiras da bobina por incrustações; falha no isolamento elétrico da bobina de indução, cujo efeito é o surgimento de arco voltaico, causado pela degradação do refratário da bobina, que ainda causa um superaquecimento da matéria prima; mal contato no barramento da bobina, cujo efeito é o surgimento de arco voltaico, causado pela falta de aperto na fixação do barramento; e falha na unidade de controle remoto, cujo efeito é a perda da função do equipamento, causado pelo desgaste dos componentes elétrico-eletrônicos.

A estação de aquecimento foi a parte do forno que apresentou maior número de modos de falha que exigiram ações de melhoria. Para o modo de falha referente a umidade na estação de aquecimento, o valor da avaliação de risco foi de 192, para os dois efeitos possíveis, arco voltaico e sobrecorrente. Isso ocorreu devido a detecção

ser apenas visual pelo operador, após a estação de aquecimento já estar molhada. Para cada um deles foi proposta uma ação de melhoria, nesse caso ações preventivas, como a substituição de mangueiras e preventiva em bobinas, com o objetivo de diminuir a ocorrência das causas identificadas. A atividade foi designada ao analista de manutenção, para elaborar e revisar os planos de manutenção preventiva das bobinas. A nova avaliação do risco resultou em 128, para os dois modos de falha.

Para o modo de falha referente ao mal contato nos barramentos internos da estação de aquecimento, o valor da avaliação de risco foi de 192, para os dois efeitos possíveis, arco voltaico e sobrecorrente. Isso ocorreu devido a detecção ser apenas visual pelo operador. Para cada um deles foram propostas ações de melhoria, nesse caso ações preventivas, como reaperto e verificação dos isoladores e a verificação do isolamento das portas, e de limpeza periódica a ser realizada pelo operador. Ações com o objetivo de diminuir a ocorrência dos modos de falhas. O analista de manutenção ficou responsável pela atualização do plano de manutenção, enquanto o engenheiro de processos e melhoria ficou responsável por introduzir a nova atividade de limpeza na rotina dos operadores, junto a produção. A nova avaliação do risco resultou em 64, para as três possíveis causas identificadas.

Para o modo de falha referente a refrigeração da bobina de indução, o valor da avaliação de risco foi de 192, para o efeito de superaquecimento. Isso ocorreu devido a detecção ser apenas visual pelo operador. Para esse modo de falha foi proposta uma ação de melhoria, acrescentar um fluxostato no circuito de refrigeração da bobina, e que esse disparasse um alarme, na detecção da diminuição do fluxo de água, no painel de operação. A atividade foi designada ao técnico eletrônico. A nova avaliação resultou na diminuição da não-detecção, de 8 para 4, resultando num risco igual a 96.

Para o modo de falha referente ao isolamento elétrico da bobina de indução, o valor da avaliação de risco foi de 512, para o efeito de arco voltaico. Isso ocorreu devido a um número maior atribuído a ocorrência, baseado no histórico de manutenção e na vivência da equipe na empresa, e a detecção ser apenas visual pelo operador. Para esse modo de falha foram propostas três ações de melhoria, todas com o objetivo de diminuir a ocorrência da causa. Foram elas, um treinamento aos operadores, para que detectem avarias no isolamento de forma mais eficaz, a definição da vida útil do isolamento para que seja substituído em caráter preventivo, e

a adequação dos produtos (diâmetro de MP) que é processado nas bobinas, que quando mal dimensionado pode danificar o isolamento. Atividades designadas ao engenheiro de processos e melhorias, ao analista de manutenção e ao coordenador do setor de engenharia. A nova avaliação do risco resultou em 128, 64 e 128, considerando o efeito das três ações respectivamente.

Para o modo de falha referente ao mal contato no barramento da bobina, o valor da avaliação de risco foi de 256, para o efeito de arco voltaico. Isso ocorreu devido a detecção ser apenas visual pelo operador. Para esse modo de falha foi proposta uma ação de melhoria, elaborar um treinamento para operadores com ênfase na fixação e limpeza dos barramentos das bobinas, com a intenção de diminuir a ocorrência da causa identificada. A nova avaliação resultou na diminuição da ocorrência, de 4 para 2, resultando num risco igual a 128.

Para o modo de falha referente a falha na unidade de controle remoto, o valor da avaliação de risco foi de 240, para o efeito de perda da função. Isso ocorreu devido a não existir nenhum tipo de controle para detecção da causa. Para esse modo de falha foi proposta uma ação de melhoria, nesse caso uma ação preventiva, revisar o plano de manutenção preventiva, com o objetivo da substituição de componentes elétricos sob um período previamente estabelecido, antes que atinjam o fim de sua vida útil. A nova avaliação resultou na diminuição da ocorrência, resultando num risco igual a 80.

Tabela 60 - Tabela FMEA do forno FI-FO-008

FMEA - Análise de Modos de Falha e Efeitos										Data: 06/09/2018			Máquina: FI-FO-008 (Forno à Indução)				
Participantes: Engenheiro de processos e melhorias, técnico eletrônico, líder de manutenção elétrica, consultor de gestão da qualidade e analista de manutenção										Responsável: Analista de Manutenção							
Item	Função	Modo de falha	Efeito	S	Causa	O	Controle	D	Risco	Ação de melhoria	Responsável	Data	S	O	D	Risco resultante	
TRANSFORMADOR	Rebaixar a tensão de alimentação	Avaria por sobretensão	Avaria geral no equipamento	10	Oscilação na rede de alimentação	1	Fusível	2	20	Nenhuma							
							Disjuntor	2	20	Nenhuma							
		Avaria por sobrecorrente	Avaria geral no equipamento	10	Oscilação na rede de alimentação	1		Fusível	2	20	Nenhuma						
								Disjuntor	2	20	Nenhuma						
		Mal contato nos conectores	Superaquecimento	8	Vibrações: elétricas e mecânicas	3	Manutenção preventiva terceirizada	6	144	Nenhuma							
		Interpéris	Arco voltaico	10	Falta de para-raio	1	Não existe	10	100	Nenhuma							
		Óleo de refrigeração	Superaquecimento	10	Perda de capacidade dielétrica	3	Manutenção preventiva terceirizada	6	180	Acrescentar um sistema de controle de temperatura para desligar o transformador quando falhar	Técnico eletrônico	22/11/2018	10	3	4	120	
		Animais	Arco voltaico	8	Falta de controle contra pragas	1	Não existe	10	80	Nenhuma							

Fonte: Autor (2019)

Tabela 60 (cont.) - Tabela FMEA do forno FI-FO-008

FMEA - Análise de Modos de Falha e Efeitos										Data: 06/09/2018		Máquina: FI-FO-008 (Forno à Indução)					
Participantes: Engenheiro de processos e melhorias, técnico eletrônico, líder de manutenção elétrica, consultor de gestão da qualidade e analista de manutenção										Responsável: Analista de Manutenção							
Item	Função	Modo de falha	Efeito	S	Causa	O	Controle	D	Risco	Ação de melhoria	Responsável	Data	S	O	D	Risco resultante	
CONVERSOR	Converter tensão de alimentação modulando a tensão e variando a frequência conforme a carga necessária	Porta, fusível, rede aberta	Perde a função	8	Erro operacional	2	Visual	8	128	Nenhuma							
					Sobretensão e sobrecorrente na alimentação	1	Visual e medição com instrumentos	7	70	Nenhuma							
		Falha na refrigeração	Superaquecimento	8	Falha na turbina	2	Supervisor de corrente	3	48	Nenhuma							
					Temperatura da água alta	2	Termostato	4	64	Nenhuma							
					Falta de água	2	Alarme	5	80	Nenhuma							
					Perda de carga	3	Visual	8	192	Acrescentar fluxostato no sistema com alerta no painel de operação.	Técnico eletrônico	26/11/2018	8	3	4	96	
		Sobretensão	Perde a função	8	Curto circuito na estação de aquecimento	3	Controle automático no circuito do conversor	3	72	Nenhuma							
		Sobrecorrente	Perde a função	8	Curto circuito na estação de aquecimento	3	Controle automático no circuito do conversor	3	72	Nenhuma							
		Falha na frequência	Perde a função	8	Avaria nos capacitores e/ou bobinas	2	Controle automático no circuito do conversor	3	48	Nenhuma							
		Umidade	Arco voltaico	8	Vazamento de água de refrigeração das bobinas e/ou barramentos	1	Visual	8	64	Nenhuma							
Falta de fase	Avaria no circuito	8	Falha em uma das fases da rede de alimentação	1	Controle automático no circuito do conversor	3	24	Nenhuma									

Fonte: Autor (2019)

Tabela 60 (cont.) - Tabela FMEA do forno FI-FO-008

FMEA - Análise de Modos de Falha e Efeitos										Data: 06/09/2018		Máquina: FI-FO-008 (Forno à Indução)					
Participantes: Engenheiro de processos e melhorias, técnico eletrônico, líder de manutenção elétrica, consultor de gestão da qualidade e analista de manutenção										Responsável: Analista de Manutenção							
Item	Função	Modo de falha	Efeito	S	Causa	O	Controle	D	Risco	Ação de melhoria	Responsável	Data	S	O	D	Risco resultante	
ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO	Aquecimento de matéria prima por indução magnética	Vazamento de óleo dielétrico dos capacitores	Diminui a função	7	Superaquecimento do óleo	1	Medição da isolamento e capacitância	7	49	Nenhuma							
		Refrigeração dos capacitores	Arco voltaico	8	Temperatura da água alta	6	Sistema de controle automático da temperatura que desliga o forno	2	96	Nenhuma							
			Sobrecorrente	8	Falta de água	6	Sistema de controle automático da pressão que desliga o forno	2	96	Nenhuma							
		Umidade	Arco voltaico	8	Vazamento de água nas espiras da bobina de indução	3	Visual	8	192	Manutenção preventiva de bobinas	Analista de Manutenção	26/11/2018	8	2	8	128	
			Sobrecorrente	8	Rompimento de mangueira da água de resfriamento	3	Visual	8	192	Manutenção preventiva para substituição das mangueiras	Analista de Manutenção	26/11/2018	8	2	8	128	
		Mal contato nos barramentos internos	Arco voltaico	8	Vibração e parafusos de fixação frouxos	3	Visual	8	192	Manutenção preventiva para reaperto e verificação dos isoladores	Analista de Manutenção	12/12/2018	8	1	8	64	
			Sobrecorrente	8	Excesso de óxido das matéria prima no barramento	3	Visual	8	192	Limpeza periódica dos barramentos	Engenheiro de Processos e Melhorias	12/12/2018	8	1	8	64	
										Manutenção preventiva para verificação do isolamento das portas	Analista de Manutenção	12/12/2018	8	1	8	64	

Fonte: Autor (2019)

Tabela 60 (cont.) - Tabela FMEA do forno FI-FO-008

FMEA - Análise de Modos de Falha e Efeitos								Data: 06/09/2018			Máquina: FI-FO-008 (Forno à Indução)					
Participantes: Engenheiro de processos e melhorias, técnico eletrônico, líder de manutenção elétrica, consultor de gestão da qualidade e analista de manutenção										Responsável: Analista de Manutenção						
Item	Função	Modo de falha	Efeito	S	Causa	O	Controle	D	Risco	Ação de melhoria	Responsável	Data	S	O	D	Risco resultante
ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO	Aquecimento de matéria prima por indução magnética	Refrigeração da bobina de indução	Superaquecimento	8	Entupimentos das espiras por incrustação	3	Visual	8	192	Acrescentar fluxostato no circuito de refrigeração da bobina com alerta no painel de operação.	Técnico eletrônico	20/12/2018	8	3	4	96
		Isolamento elétrico da bobina de indução	Arco voltaico	8	Degradação do refratário (superaquecimento)	8	Visual	8	512	Treinamento para operadores	Engenheiro de Processos e Melhorias	07/11/2018	8	2	8	128
										Definição da vida útil da bobina (manutenção preventiva)	Analista de Manutenção	20/02/2019	8	1	8	64
										Adequação do produto a bobina	Coordenador de Engenharia	20/02/2019	8	2	8	128
		Mal contato no barramento da bobina	Arco voltaico	8	Falta de aperto na fixação	4	Visual	8	256	Elaborar treinamento com ênfase na fixação e limpeza dos barramentos	Engenheiro de Processos e Melhorias	07/11/2018	8	2	8	128
		Falha na unidade de controle remoto	Perda da função	8	Desgaste de componentes	3	Não existe	10	240	Revisar o plano de manutenção preventiva	Analista de Manutenção	04/10/2018	8	1	10	80

Fonte: Autor (2019)

### 5.3 FMEA MH-FO-001

Serão destacados os modos de falha que apresentaram os maiores valores de risco, maiores que 150, e as ações de melhoria propostas para esses itens. As ações são validadas com a atualização do valor de risco, que deve ser menor que 150. O FMEA do martelo hidráulico, MH-FO-001, é apresentado na Tabela 61.

Para a realização da análise dos modos de falha e efeito, o martelo foi dividido em quatro partes principais, bomba hidráulica, motor elétrico 50cv, válvulas hidráulicas de acionamento e sistema de acionamento elétrico.

A primeira parte analisada, a bomba hidráulica, tem a função de prover fluxo de óleo hidráulico para a movimentação do martelo. Foram identificados para essa parte cinco modos de falha: impurezas no óleo hidráulico, cujo efeito é a perda da função do equipamento, causado pelo desgaste nos fusos da bomba; lubrificação, cujo efeito é a perda da função do equipamento, causado pela falta de lubrificação na bomba; desgaste nos fusos da bomba, cujo efeito é o aquecimento do óleo hidráulico, causado pela falta de fluxo de óleo hidráulico; réguas de alinhamento, cujo efeito é o aquecimento do óleo hidráulico, causado por réguas trancadas por falta de lubrificação; trocador de calor, cujo efeito é o aquecimento do óleo hidráulico, causado por falha no trocador de calor.

Para a bomba hidráulica destacaram-se três modos de falha. O primeiro, referente a impurezas no óleo hidráulico, cuja avaliação do risco resultou em 480 para o efeito de perda da função. Isso ocorreu devido a um número maior atribuído a detecção da causa, que não existe. Para esse modo de falha foi proposta uma ação de melhoria com o objetivo de diminuir a ocorrência. Foi definida a instalação de uma estação de tratamento/filtragem do óleo hidráulico, para realizar a sua filtragem durante o funcionamento da máquina, evitando que impurezas no óleo circulem no sistema hidráulico da máquina. Essa atividade foi destinada ao coordenador de manutenção, visto a necessidade de um investimento significativo. A nova avaliação resultou na diminuição da ocorrência, de 6 para 1, resultando num risco igual a 80.

Para o modo de falha referente ao desgaste da bomba hidráulica, o valor da avaliação de risco foi de 210, para o efeito de aquecimento do óleo hidráulico. Isso ocorreu devido a um número maior atribuído a detecção da causa, que não existe. Para esse modo de falha foi proposto uma ação de melhoria, acrescentar um

fluxostato no sistema, com o objetivo de detectar se há fluxo de óleo suficiente para operação da máquina, com alerta no painel de operação, com o objetivo de diminuir a não detecção da causa. Essa atividade ficou sob responsabilidade do técnico eletrônico. A nova avaliação do risco resultou na diminuição da não-deteção, de 10 para 3, resultando num risco igual a 63.

Para o modo de falha referente ao trocador de calor do martelo, o valor da avaliação de risco foi de 210, para o efeito de aquecimento do óleo hidráulico, causado pelo não funcionamento do trocador de calor. Isso ocorreu devido a um número maior atribuído a detecção da causa, que não existe. Para essa causa foi proposta uma ação de melhoria, acrescentar um termostato no sistema, com o objetivo de detectar uma elevação anormal da temperatura do óleo, com alerta no painel de operação, com o objetivo de diminuir a não-deteção da causa. Essa atividade ficou sob responsabilidade do técnico eletrônico. A nova avaliação do risco resultou na diminuição da não-deteção, de 10 para 3, resultando num risco igual a 63.

O motor elétrico de 50cv tem a função de converter energia elétrica em energia mecânica. Foram identificados para essa parte três modos de falha: falta de fase, cujo efeito é a perda da função do equipamento, causado pelo rompimento da fiação e/ou pela falha na alimentação externa, de responsabilidade da distribuidora de energia elétrica; rolamentos, cujo efeito é o aquecimento e queima do motor, causado pela falta de lubrificação nos rolamentos e/ou pela chegada do final de sua vida útil; acoplamento do motor com a bomba hidráulica, cujo efeito é o aquecimento e queima do motor, causado por parafusos de fixação frouxos devido à vibração.

No motor elétrico de 50cv destacou-se o modo de falha referente aos rolamentos do motor, cuja avaliação resultou em 350 para a causa referente à falta de lubrificação. Isso ocorreu devido a um número maior atribuído a detecção da causa, que não existe, combinada com a ocorrência. Foi proposta uma ação de melhoria para diminuir a ocorrência e a não-deteção. A realização de uma manutenção preditiva, como a utilização de ferramentas de termografia para monitorar a temperatura dos rolamentos do motor, disparando a necessidade de lubrificação conforme detecção de um aumento anormal da temperatura. A nova avaliação resultou na diminuição da ocorrência, de 5 para 2, e da não-deteção, de 10 para 7, resultando num risco igual a 98.

O conjunto de válvulas de acionamento hidráulicas tem a função de controlar o acionamento hidráulico do martelo. Foram identificados para essa parte dois modos

de falha: impurezas no óleo hidráulico, cujo efeito é a perda da função do equipamento, causado pelo travamento do êmbolo da válvula; e falha na válvula pneumática piloto, cujo efeito é perda da função do equipamento, causado pelo travamento da válvula devido à umidade na rede de ar comprimido.

Nas válvulas hidráulicas de acionamento destacaram-se os dois modos de falha. No primeiro referente a impurezas no óleo hidráulico, cuja avaliação do risco resultou em 480 para a causa de travamento do êmbolo da válvula. Isso ocorreu devido a um número maior atribuído a detecção da causa, que não existe, combinada com a ocorrência. Foi proposta pela equipe a ação de melhoria para instalação de uma estação de tratamento/filtragem do óleo hidráulico, para realizar a sua filtragem durante o funcionamento da máquina, evitando que impurezas no óleo circulem no sistema hidráulico na máquina. Essa atividade foi destinada ao coordenador de manutenção, visto a necessidade de um investimento significativo. A nova avaliação resultou na diminuição da ocorrência, de 8 para 1, resultando num risco igual a 80.

Para o modo de falha referente a válvula pneumática piloto, responsável pelo comando de algumas válvulas hidráulicas, o valor da avaliação de risco foi de 640, para a perda da função causada pela umidade na rede de ar comprimido da empresa. Isso ocorreu devido a um número maior atribuído a detecção da causa, que não existe, combinada com a ocorrência. Para essa causa foi proposta uma ação de melhoria, a instalação de um secador de ar comprimido para a rede de ar comprimido da empresa, com o objetivo de eliminar a umidade da rede, diminuindo assim a ocorrência desse modo de falha, de 8 para 1. Essa atividade foi destinada ao coordenador de manutenção, visto a necessidade de um investimento significativo. A nova avaliação do risco resultou em 80.

O sistema de acionamento elétrico tem a função de controlar o acionamento do martelo. Foram identificados para essa parte dois modos de falha: falha no pedal de acionamento, cujo efeito é a perda da função do equipamento, causado por uma avaria na microchave do pedal e/ou avaria no cabo de ligação do pedal com o controle; e falha nos sensores de posicionamento do martelo, cujos efeitos são a colisão do martelo, causada pela queima do sensor de segurança (fim de curso), e/ou a perda da lógica de acionamento, causada pela falha no sensor de grande impulso e pequeno impulso e/ou no sensor de posição do martelo em baixo.

O sistema de acionamento elétrico apresentou dois modos de falha que exigiram ações de melhoria, ambos com mais de uma causa. Para o modo de falha

referente à falha no pedal de acionamento, o valor da avaliação de risco foi de 400 e 640, para as duas causas responsáveis pelo efeito de perda da função, avaria na microchave do pedal e o rompimento do cabo de ligação do pedal com o controle, respectivamente. Isso ocorreu devido a um número maior atribuído a detecção da causa, que não existe, combinada com a ocorrência, para as duas possíveis causas. Para cada um deles foi proposta uma ação de melhoria, nesse caso ações preventivas, como a inspeção e substituição periódica da microchave e cabos de ligação do pedal, ambas com o objetivo de diminuir a ocorrência e a não-detecção dos modos de falhas, que para ambos passou para 2 e 7, respectivamente. A nova avaliação do risco resultou em 112, para os dois modos de falha.

Para o modo de falha referente a falha nos sensores de posicionamento do martelo, o valor da avaliação de risco foi de 600, para colisão do martelo causada pela falha no sensor de segurança do martelo, o sensor de fim de curso. Isso ocorreu devido a um número maior atribuído a detecção da causa, que não existe, combinada com a ocorrência e a severidade, que neste caso pode afetar a segurança do operador. Para a perda da lógica de acionamento, causada pela falha nos sensores de grande e pequeno impulso, e sensor de posição “em baixo” do martelo, duas causas distintas, obteve-se valores de risco respectivos de 240 e 480. Isso ocorreu devido a um número maior atribuído a detecção da causa, que não existe, combinada com a ocorrência. Para cada um deles foi proposta uma ação de melhoria, a mesma para as três causas identificadas, a instalação de dois sensores para cada uma das funções, criando uma redundância de acionamento quando a falha de algum, além da instalação de um alarme de falha dos sensores no painel de controle do operador, ambas ações com o objetivo de diminuir a ocorrência e a não-detecção do modo de falha, que para ambos passa a 3. A nova avaliação do risco resultou em 90, 72 e 72, respectivamente para as três causas identificadas.

Tabela 61 - Tabela FMEA do martelo MH-FO-001

FMEA - Análise de Modos de Falha e Efeitos										Data: 13/11/2018		Máquina: MH-FO-001 (Martelo Hidráulico)					
Participantes: Engenheiro de processos e melhorias, técnico eletrônico, líder de manutenção elétrica, consultor de gestão da qualidade e analista de manutenção										Responsável: Analista de Manutenção							
Item	Função	Modo de falha	Efeito	S	Causa	O	Controle	D	Risco	Ação de melhoria	Responsável	Data	S	O	D	Risco resultante	
BOMBA HIDRÁULICA	Prover fluxo de óleo hidráulico para a movimentação do martelo	Impurezas no óleo hidráulico	Perda da função	8	Desgaste nos fusos da bomba	6	Não existe	10	480	Instalação de uma estação de tratamento do óleo hidráulico, realizar a filtragem durante o funcionamento	Coordenador de manutenção	15/02/2019	8	1	10	80	
		Lubrificação	Perda da função	8	Falta de lubrificação	3	Rotina de inspeção periódica	6	144	Nenhuma							
		Desgaste nos fusos da bomba	Aquecimento do óleo hidráulico	7	Falta de fluxo de óleo hidráulico	3	Não existe	10	210	Acrescentar fluxostato no sistema com alerta no painel de operação.	Técnico eletrônico	10/01/2019	7	3	3	63	
		Réguas de alinhamento	Aquecimento do óleo hidráulico	7	Réguas trancadas por falta de lubrificação	3	Rotina de inspeção periódica	6	126	Nenhuma							
		Trocador de calor	Aquecimento do óleo hidráulico	7	Falha no trocador de calor	3	Não existe	10	210	Instalação de termostato para controle de temperatura da água do trocador de calor	Técnico eletrônico	10/01/2019	7	3	3	63	

Fonte: Autor (2019)

Tabela 61 (cont.) - Tabela FMEA do martelo MH-FO-001

FMEA - Análise de Modos de Falha e Efeitos										Data: 13/11/2018		Máquina: MH-FO-001 (Martelo Hidráulico)				
Participantes: Engenheiro de processos e melhorias, técnico eletrônico, líder de manutenção elétrica, consultor de gestão da qualidade e analista de manutenção										Responsável: Analista de Manutenção						
Item	Função	Modo de falha	Efeito	S	Causa	O	Controle	D	Risco	Ação de melhoria	Responsável	Data	S	O	D	Risco resultante
MOTOR ELÉTRICO 50CV	Converter energia elétrica em energia mecânica	Falta de fase	Perda da função	8	Rompimento da fiação	8	Relé de falta de fase	2	128	Nenhuma						
					Falha na alimentação externa (distribuidora de energia elétrica)	3	Relé de falta de fase	2	48	Nenhuma						
		Rolamentos	Aquecimento e queima do motor	7	Falta de lubrificação	5	Não existe	10	350	Manutenção preditiva (termografia)	Analista de manutenção	15/01/2019	7	2	7	98
					Final da vida útil dos rolamentos	2	Não existe	10	140	Nenhuma						
		Acoplamento do motor/bomba	Aquecimento e queima do motor	7	Parafusos de fixação frouxos devido a vibração	2	Manutenção preventiva	7	98	Nenhuma						
VÁLVULAS HIDRÁULICAS DE AÇIONAMENTO	Controlar o acionamento hidráulico do martelo	Impurezas no óleo hidráulico	Perda da função	8	Travamento do êmbolo da válvula	6	Não existe	10	480	Instalação de uma estação de tratamento do óleo hidráulico, realizar a filtragem durante o funcionamento	Coordenador de manutenção	15/02/2019	8	1	10	80
		Válvula pneumática piloto	Perda da função	8	Válvula travada devido a umidade na rede de ar comprimido	8	Não existe	10	640	Instalação de secador de ar comprimido para a rede da empresa	Coordenador de manutenção	10/03/2019	8	1	10	80

Fonte: Autor (2019)

Tabela 61 (cont.) - Tabela FMEA do martelo MH-FO-001

FMEA - Análise de Modos de Falha e Efeitos										Data: 13/11/2018		Máquina: MH-FO-001 (Martelo Hidráulico)						
Participantes: Engenheiro de processos e melhorias, técnico eletrônico, líder de manutenção elétrica, consultor de gestão da qualidade e analista de manutenção										Responsável: Analista de Manutenção								
Item	Função	Modo de falha	Efeito	S	Causa	O	Controle	D	Risco	Ação de melhoria	Responsável	Data	S	O	D	Risco resultante		
SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO	Controlar o acionamento do martelo	Falha no pedal	Perda da função	8	Avaria na microchave do pedal	5	Não existe	10	400	Manutenção preventiva	Analista de manutenção	15/01/2019	8	2	7	112		
					Cabo de ligação do pedal com o controle avariado	8	Não existe	10	640	Manutenção preventiva	Analista de manutenção	15/01/2019	8	2	7	112		
		Falha nos sensores de posicionamento	Perda da lógica de acionamento	8	Colisão do martelo	10	Sensor de segurança (fim de curso) queimado	6	Não existe	10	600	Instalar dois sensores para criar redundância e alarme de sensor em falha no painel de operação	Técnico eletrônico	10/12/2018	10	3	3	90
					Sensor de grande impulso e pequeno impulso com falha	3	Não existe	10	240	Instalar dois sensores para criar redundância e alarme de sensor em falha no painel de operação	Técnico eletrônico	10/12/2018	8	3	3	72		
					Sensor de posição martelo embaixo com falha	6	Não existe	10	480	Instalar dois sensores para criar redundância e alarme de sensor em falha no painel de operação	Técnico eletrônico	10/12/2018	8	3	3	72		

Fonte: Autor (2019)

## 6 CONCLUSÃO

O objetivo da dissertação foi desenvolver um método para definir a estratégia de manutenção de uma empresa metal-mecânica do ramo de forjados. Foi aplicada a MCC para a identificação do período do ciclo de vida em que cada máquina se encontra, para então a definição das estratégias de manutenção mais adequadas a cada uma, e na identificação e tratamento dos modos de falha das máquinas críticas identificadas na linha de forjamento.

Para definir a estratégia de manutenção para máquinas em série de uma linha de produção de uma forjaria e para máquinas em paralelo do setor de corte de matéria prima. O método de pesquisa foi a modelagem quantitativa, acrescida da simulação computacional. Para a identificação dos modos de falha das máquinas a pesquisa pode ser definida como exploratória, pois explorou a utilização da ferramenta FMEA em duas máquinas da linha de forjamento.

A Tabela 62 apresenta os resultados obtidos na simulação, para a linha de forjamento e setor de corte, compilados.

Tabela 62 - Resultados modelagem quantitativa máquinas

<b>Máquina</b>	<b>MD TBF</b>	<b>MD TTR</b>	<b>MTBF</b>	<b>MTTR</b>	<b>AV</b>
FI-FO-008	Weibull	Nenhum	98,25h	1,77h	98,23%
MH-FO-001	Weibull	Lognormal	55,72h	2,01h	96,52%
PE-FO-051	Weibull	Lognormal	322,79h	0,83h	99,74%
PE-FO-052	Exponencial	Nenhum	568,28h	2,36h	99,58%
PF-FO-016	Exponencial	Nenhum	174,52h	0,83h	99,53%
PC-CO-001	Weibull	Lognormal	142,74h	2,52h	98,27%
PC-CO-003	Exponencial	Nenhum	63,60h	1,65h	97,48%
PC-CO-004	Exponencial	Nenhum	72,43h	2,38h	96,83%
SH-CO-001	Exponencial	Lognormal	164,00h	2,08h	98,75%
SH-CO-002	Exponencial	Nenhum	126,60h	2,77h	97,86%
SH-CO-003	Exponencial	Nenhum	279,45h	2,79h	99,01%
SH-CO-004	Weibull	Lognormal	154,23h	6,77h	95,79%
SH-CO-005	Weibull	Lognormal	309,58h	6,08h	98,07%

Fonte: Autor (2019)

Das máquinas analisadas, seis estão no período de mortalidade infantil. Neste caso, o indicado é a manutenção corretiva. As demais máquinas encontram-se no período de maturidade, sendo recomendada a estratégia de manutenção preditiva. A empresa adota estratégia de manutenção preventiva combinada com manutenção de emergência.

É importante salientar que as máquinas que se encontram no período de mortalidade infantil são máquinas antigas, com mais de trinta anos, o que confirma a inadequação da estratégia de manutenção preventiva, que as manteve em mortalidade infantil. De modo geral, a cada seis meses, certos componentes são substituídos de modo incondicional, o que impede que peças robustas tenham vida longa. Da mesma maneira, nas manutenções de emergência não há estudo para identificar se os componentes que falharam estão subdimensionados. Estes são apenas substituídos por peças idênticas, não eliminando o modo de falha e impedindo a evolução do equipamento ao longo da curva da banheira. A manutenção corretiva exige que após uma quebra, seja realizado um estudo para verificar se o componente que falhou não é frágil, devido a erro de projeto ou de montagem, o que não é feito. Confirmada a fragilidade, deve-se substituir o componente por um mais resistente, eliminando o modo de falha. Para as máquinas que se encontram no período de maturidade é recomendada a manutenção preditiva. Essa estratégia é uma técnica de gerenciamento que avalia regularmente a condição de operação real dos equipamentos, gerando dados que servirão de base para a definição das ações a serem tomadas com o objetivo de evitar que a falha ocorra e minimizando falhas.

Referente aos sistemas produtivos, de acordo com o diâmetro da matéria prima a ser processada, obteve-se valores diferentes de tempo médio entre falhas e disponibilidade. Para os três primeiros cenários nota-se que conforme a diminuição do número de máquinas no arranjo paralelo (corte de matéria prima), que está combinado com o arranjo em série (forjamento), representa um aumento na disponibilidade do sistema. Os demais sistemas são compostos por máquinas diferentes em paralelo, logo não há uma relação entre as disponibilidades. O sistema produtivo para produção de peças cuja matéria prima é de Ø64mm até Ø120mm, apresentou o melhor valor de MTBF, entre todas as combinações. O comparativo dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 63.

Tabela 63 - Comparativo resultados dos sistemas produtivos

<b>Sistema produtivo</b>	<b>MTBF</b>	<b>AV</b>
Produção de peças até Ø25,4mm	14,31h	86,82%
Produção de peças de Ø26 até Ø34mm	9,06h	88,34%
Produção de peças de Ø35 até Ø63mm	11,29h	90,63%
Produção de peças de Ø64 até Ø120mm	14,39h	89,56%
Produção de peças em perfil	14,22h	88,05%

Fonte: Autor (2019)

A análise dos modos de falha e seus efeitos possibilitaram propostas de melhorias nos processos de manutenção das duas máquinas identificadas como críticas para o processo de forja, o forno a indução, FI-FO-008 e o martelo hidráulico, MH-FO-001. O FMEA teve como equipe um grupo de funcionários da empresa de diversas áreas, mecânica, elétrica, eletrônica e de processos. Este grupo possibilitou uma análise ampla e detalhada nos diversos aspectos das manutenções realizadas nas máquinas estudadas. As falhas críticas foram elencadas e ações de melhoria definitivas e mitigadoras foram propostas em função do risco apresentado.

A realização do FMEA possibilitou uma complementação das estratégias de manutenção adequadas para as máquinas analisadas. A modelagem probabilística dos tempos de falha apontou o forno FI-FO-008 e o martelo MH-FO-001 como no estado no período de mortalidade infantil, onde é mais adequado o tratamento das falhas com a manutenção corretiva. Porém o FMEA apresentou, através das discussões da equipe multidisciplinar, que algumas atividades de manutenção preventiva, e em alguns casos preditiva, poderiam diminuir a ocorrência e a não-deteção de determinados modos de falha, diminuindo paradas inesperadas para manutenção e aumentando a disponibilidade das máquinas.

Através das análises realizadas, foram detectadas as máquinas e subsistemas críticos do ponto de vista de confiabilidade. Orientando a empresa estudada para onde direcionar seus esforços de melhoria.

Para a continuidade deste estudo sugere-se o estudo da confiabilidade e manutenibilidade das máquinas das demais etapas do processo produtivo do forjado, tais como o setor de jateamento e tratamento térmico. Realizando, também, o FMEA para análise dos modos de falha das máquinas críticas identificadas nestes outros setores.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5462. Confiabilidade e manutenibilidade. **Associação Brasileira De Normas Técnicas**, n. 1, p. 37, 1994.

AHUJA, I. P. S.; KHAMBA, J. S. Total productive maintenance implementation in a manufacturing organisation. **International Journal of Productivity and Quality Management**, v. 3, n. 3, p. 360–381, 2008.

ALASWAD, S.; XIANG, Y. A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 157, p. 54–63, 2017.

ALRABGHI, A.; TIWARI, A. State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems. **Computers and Industrial Engineering**, v. 82, p. 167–182, 2015.

ANTUNES, J. et al. **Sistemas de produção: conceitos e práticas para projetos e gestão da produção enxuta**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2008.

ARAÚJO, R. S. et al. Premature wear and recurring bearing failures in three-phase induction motors: A case study. **IEEE Latin America Transactions**, v. 9, n. 4, p. 528–533, 2011.

ARNO, R. et al. What is RCM and how could it be applied to the critical loads? **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 3, p. 2045–2053, 2015.

AZADEH, A.; ABDOLHOSSEIN ZADEH, S. An integrated fuzzy analytic hierarchy process and fuzzy multiple-criteria decision-making simulation approach for maintenance policy selection. **Simulation**, v. 92, n. 1, p. 3–18, 2016.

BAIDYA, R. et al. Strategic maintenance technique selection using combined quality function deployment, the analytic hierarchy process and the benefit of doubt approach. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, n. 1–4, p. 31–44, 2018.

BANGHART, M.; BABSKI-REEVES, K.; STRAWDERMAN, L. Subjectivity in Failure Mode Effects Analysis ( FMEA ) Severity Classification within a Reliability Centered Maintenance ( RCM ) Context. **International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace**, v. 5, n. 1, 2018.

BEN-DAYA, M. et al. **Handbook of Maintenance Management and Engineering**. Londres: Springer, 2009.

BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. N. A produção científica nos anais do

encontro nacional de engenharia de produção: um levantamento de métodos e tipos de pesquisa. **Produção**, v. 9, n. 2, p. 65–75, 2000.

BERTRAND, W. M. J.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.

BIAN, J.; SUN, X.; YANG, J. Failure Mode and Effect Analysis of Power Transformer Based on Cloud Model of Weight. **TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)**, v. 13, n. 3, p. 776, 2015.

BORJALILU, N.; GHAMBARI, M. Optimal maintenance strategy selection based on a fuzzy analytical network process : A case study on a 5-MW powerhouse. v. 10, p. 1–10, 2018.

CARNERA, M. C. Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study. **Decision Support Systems**, v. 38, n. 4, p. 539–555, 2005.

CARNERO, M. C.; GÓMEZ, A. Maintenance strategy selection in electric power distribution systems. **Energy**, v. 129, p. 255–272, 2017.

CASTRO, B. et al. Partial discharge monitoring in power transformers using low-cost piezoelectric sensors. **Sensors (Switzerland)**, v. 16, n. 8, p. 3225–3231, 2016.

CHEMWENO, P. et al. Development of a novel methodology for root cause analysis and selection of maintenance strategy for a thermal power plant: A data exploration approach. **Engineering Failure Analysis**, v. 66, p. 19–34, 2016.

DACHYAR, M.; NURCAHYO, R.; TOHIR, Y. Maintenance strategy selection for steam power plant in range of capacity 300 - 625 MW in Indonesia. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 13, n. 7, p. 2571–2580, 2018.

DE FARIA, H.; COSTA, J. G. S.; OLIVAS, J. L. M. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 46, p. 201–209, 2015.

DE SIQUEIRA, I. P. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação**. [s.l.] Qualitymark, 2005.

DESHPANDE, V. S.; MODAK, J. P. Application of RCM to a medium scale industry. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 77, n. 1, p. 31–43, 2002.

DING, S. H.; KAMARUDDIN, S. Maintenance policy optimization—literature review and directions. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 5–8, p. 1263–1283, 2014.

EMOVON, I.; NORMAN, R. A.; MURPHY, A. J. Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 29, n. 3, p. 519–531, 2018.

FERREIRA, U. M. et al. Thermography as a Tool in Electric Panels Maintenance. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 9, p. 3005–3009, 2015.

FILHO, J. C. B. et al. Process-Aware FMEA framework for failure analysis in maintenance. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 28, n. 6, p. 822–848, 2017.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2009.

FRASER, K.; HVOLBY, H.-H.; TSENG, T.-L. (BILL). **Maintenance management models: a study of the published literature to identify empirical evidence**. [s.l: s.n.]. v. 32

FRITSCH, C. PROCONF: Um Software orientado para Análises de Confiabilidade. **XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, n. 9, 1998.

GE, Y. et al. An integrated logarithmic fuzzy preference programming based methodology for optimum maintenance strategies selection. **Applied Soft Computing Journal**, v. 60, p. 591–601, 2017.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. 1. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. **A meta**. São Paulo: Educator, 1997.

GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, A. et al. Condition monitoring of wind turbine pitch controller: A maintenance approach. **Measurement**, v. 123, n. January, p. 80–93, jul. 2018.

HASHEMIAN, H. M.; BEAN, W. C. State-of-the-art predictive maintenance techniques. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 60, n. 10, p. 3480–3492, 2011.

HIGGINS, R. **Maintenance Engineering Handbook**. 6<sup>a</sup> ed. New York: Mc. Graw-Hill, 2001.

HOKSTAD, P. The failure intensity process and the formulation of reliability and maintenance models. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 58, n. 1, p. 69–82, 1997.

HOOI, L. W.; LEONG, T. Y. Total productive maintenance and manufacturing performance improvement. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 23,

n. 1, p. 2–21, 2017.

IQA, I. DA Q. A. **Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial: FMEA**. 4. ed. São Paulo: IQA, 2008.

KARTHIK, S. et al. Optimizing maintenance strategy using simulation based AHP. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, v. 8, n. 9, p. 104–111, 2017.

KIRUBAKARAN, B.; ILANGKUMARAN, M. The selection of optimum maintenance strategy based on ANP integrated with GRA-TOPSIS. **Journal for Global Business Advancement**, v. 8, n. 2, p. 190–215, 2015.

KIRUBAKARAN, B.; ILANGKUMARAN, M. Selection of optimum maintenance strategy based on FAHP integrated with GRA-TOPSIS. **Annals of Operations Research**, v. 245, n. 1–2, p. 285–313, 2016.

KUMAR, U. et al. Maintenance performance metrics: a state-of-the-art review. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 19, n. 3, p. 233–277, 2013.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LAZAKIS, I.; ÖLÇER, A. Selection of the best maintenance approach in the maritime industry under fuzzy multiple attributive group decision-making environment. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment**, v. 230, n. 2, p. 297–309, 2014.

MANZINI, R. et al. The scheduling of maintenance. A resource-constraints mixed integer linear programming model. **Computers and Industrial Engineering**, v. 87, p. 561–568, 2015.

MENDES, A. A.; RIBEIRO, J. L. D. Um estudo do suporte quantitativo necessário para a operacionalização da MCC. **Production**, v. 21, n. 4, p. 583–593, 2011.

MENGUE, D. C.; SELLITO, M. A. Estratégia de Manutenção Baseada em Funções de Confiabilidade para uma Bomba Centrífuga Petrolífera. **Revista Produção Online**, v. 13, n. 2, p. 759–783, 2013.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007.

MISOCZKY, M. C.; MILANO, M.; VIEIRA, F. Desempenho e qualidade no campo das organizações públicas: uma reflexão sobre significados \*. **Revista de Administração Pública, RAP-FGV**, v. 35, n. 5, p. 163–177, 2001.

MONTE, M. B. S.; ALMEIDA FILHO, A. T. DE. A reliability-based approach to maximize availability in a water supply system. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 12, p. 3807–3812, 2015.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2010.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered-maintenance: second edition**. 2<sup>o</sup> ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.

NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM: Total Productive Maintenance**. [s.l.] Productivity Press, Inc., 1988.

NOURI GHARAHASANLOU, A. et al. Risk based maintenance strategy: a quantitative approach based on time-to-failure model. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, v. 8, n. 3, p. 602–611, 2017.

OSADA, T. **The 5-S: Five Keys to a Total Quality Environment**. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1991.

ÖZCAN, E. C.; ÜNLÜSOY, S.; EREN, T. A combined goal programming – AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, n. February, p. 1410–1423, 2017.

PACHECO, D. A. DE J. et al. Modelo de Gerenciamento da capacidade produtiva: Integrando Teoria das Restrições e o índice de rendimento operacional global. **Revista Produção Online**, n. 1988, p. 806–826, 2012.

PANCHAL, D. et al. Integrated fuzzy AHP-CODAS framework for maintenance decision in urea fertilizer industry. **Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research**, v. 51, n. 3, p. 179–196, 2017.

PATIDAR, L.; SONI, V. K.; SONI, P. K. Maintenance Strategies and their Combine Impact on Manufacturing Performance. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development**, v. 7, n. 1, p. 13–22, 2017.

RANDHAWA, J. S.; AHUJA, I. S. 5S implementation methodologies: literature review and directions. **International Journal of Productivity and Quality Management**, v. 20, n. 1, p. 48, 2017.

RASTEGARI, A.; SALONEN, A. **Strategic maintenance management: Formulating maintenance strategy**. Proceedings of the 26th International Conference of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management.

Anais...Helsinki: 2013

RAUSAND, M. Reliability centered maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 60, p. 121–132, 1998.

ROESCH, W. J. Using a new bathtub curve to correlate quality and reliability. **Microelectronics Reliability**, v. 52, n. 12, p. 2864–2869, 2012.

SEECHARAN, T.; LABIB, A.; JARDINE, A. Maintenance strategies: Decision Making Grid vs Jack-Knife Diagram. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 24, n. 1, p. 61–78, 2018.

SEITI, H. et al. Maintenance strategy selection with risky evaluations using RAHP. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 24, n. 5–6, p. 257–274, 2017.

SEITI, H.; HAFEZALKOTOB, A.; FATTAHI, R. Extending a pessimistic–optimistic fuzzy information axiom based approach considering acceptable risk: Application in the selection of maintenance strategy. **Applied Soft Computing Journal**, v. 67, p. 895–909, 2018.

SELLITTO, M. A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Produção**, v. 15, n. 1, p. 44–59, 2005.

SELLITTO, M. A.; BORCHARDT, M.; ARAÚJO, D. R. C. DE. Manutenção Centrada em Confiabilidade: uma abordagem quantitativa. **XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, p. 85, 2002.

SELLITTO, M. A.; BRUSIUS JR, W. Maintenance strategy based on reliability analytical models for three parallel mechanical transformation machines. **IEEE Latin America Transactions**, v. 15, p. 988–993, 2017.

SHAFIEE, M. Maintenance strategy selection problem: An MCDM overview. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 21, n. 4, p. 378–402, 2015.

VELMURUGAN, R. S.; DHINGRA, T. **Maintenance strategy selection and its impact in maintenance function: A conceptual framework**. [s.l: s.n.]. v. 35

VISHNU, C. R.; REGIKUMAR, V. Reliability Based Maintenance Strategy Selection in Process Plants: A Case Study. **Procedia Technology**, v. 25, n. Raerest, p. 1080–1087, 2016.

WARD, P.; BICKFORD, D.; LEONG, G. Configuration of Manufacturing Strategy, Business Strategy, Environment and Structure. **Journal of Management**, v. 22, n. 4, p. 597–626, 1996.

XIE, M.; KONG, H.; GOH, T. N. Exponential approximation for maintained {W}eibull distributed component. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.

6, n. 4, p. 260–268, 2000.

## APÊNDICE A – TEMPOS DE PROCESSAMENTO DE MÁQUINA POR ITEM

ITEM	PESO (kg)	Ø (mm)	MÁQUINA	GOLPES	TEMPO DE MÁQUINA (s)	TEMPO TOTAL DE PROC (s)	TEMPO TOTAL DE PROC (h)
707160	0,44	PERFIL	FI-FO-008	0	0	0	0
707160	0,44	PERFIL	MH-FO-001	4	2,99	11,96	0,0033222
707160	0,44	PERFIL	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707160	0,44	PERFIL	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707160	0,44	PERFIL	PF-FO-016	0	6,57	0	0
707363	0,44	PERFIL	FI-FO-008	0	0	0	0
707363	0,44	PERFIL	MH-FO-001	4	2,99	11,96	0,0033222
707363	0,44	PERFIL	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707363	0,44	PERFIL	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707363	0,44	PERFIL	PF-FO-016	0	6,57	0	0
707162	0,44	PERFIL	FI-FO-008	0	0	0	0
707162	0,44	PERFIL	MH-FO-001	4	2,99	11,96	0,0033222
707162	0,44	PERFIL	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707162	0,44	PERFIL	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707162	0,44	PERFIL	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707249	0,44	PERFIL	FI-FO-008	0	0	0	0
707249	0,44	PERFIL	MH-FO-001	4	2,99	11,96	0,0033222
707249	0,44	PERFIL	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707249	0,44	PERFIL	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707249	0,44	PERFIL	PF-FO-016	0	6,57	0	0
707169	1	PERFIL	FI-FO-008	0	0	0	0
707169	1	PERFIL	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707169	1	PERFIL	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707169	1	PERFIL	PE-FO-052	0	5,55	0	0
707169	1	PERFIL	PF-FO-016	0	6,57	0	0
707255	1	PERFIL	FI-FO-008	0	0	0	0
707255	1	PERFIL	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707255	1	PERFIL	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707255	1	PERFIL	PE-FO-052	0	5,55	0	0
707255	1	PERFIL	PF-FO-016	0	6,57	0	0
707168	1	PERFIL	FI-FO-008	0	0	0	0
707168	1	PERFIL	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707168	1	PERFIL	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707168	1	PERFIL	PE-FO-052	0	5,55	0	0
707168	1	PERFIL	PF-FO-016	0	6,57	0	0
707254	1	PERFIL	FI-FO-008	0	0	0	0
707254	1	PERFIL	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707254	1	PERFIL	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707254	1	PERFIL	PE-FO-052	0	5,55	0	0
707254	1	PERFIL	PF-FO-016	0	6,57	0	0
707167	1	PERFIL	FI-FO-008	0	0	0	0
707167	1	PERFIL	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528

707167	1	PERFIL	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707167	1	PERFIL	PE-FO-052	0	5,55	0	0
707167	1	PERFIL	PF-FO-016	0	6,57	0	0
707351	1,015	47,6	FI-FO-008	0	0	0	0
707351	1,015	47,6	MH-FO-001	11	2,99	32,89	0,0091361
707351	1,015	47,6	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707351	1,015	47,6	PE-FO-052	0	5,55	0	0
707351	1,015	47,6	PF-FO-016	0	6,57	0	0
707352	1,095	PERFIL	FI-FO-008	0	0	0	0
707352	1,095	PERFIL	MH-FO-001	11	2,99	32,89	0,0091361
707352	1,095	PERFIL	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707352	1,095	PERFIL	PE-FO-052	0	5,55	0	0
707352	1,095	PERFIL	PF-FO-016	0	6,57	0	0
707157	1,21	38,1	FI-FO-008	1	9,68	9,68	0,0026889
707157	1,21	38,1	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707157	1,21	38,1	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707157	1,21	38,1	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707157	1,21	38,1	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707022	1,234	38,10	FI-FO-008	1	9,87	9,87	0,0027417
707022	1,234	38,10	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707022	1,234	38,10	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707022	1,234	38,10	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707022	1,234	38,10	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707021	1,234	38,1	FI-FO-008	1	9,87	9,87	0,0027417
707021	1,234	38,1	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707021	1,234	38,1	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707021	1,234	38,1	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707021	1,234	38,1	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707152	1,342	38,1	FI-FO-008	1	10,74	10,74	0,0029833
707152	1,342	38,1	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707152	1,342	38,1	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707152	1,342	38,1	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707152	1,342	38,1	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707153	1,342	38,1	FI-FO-008	1	10,74	10,74	0,0029833
707153	1,342	38,1	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707153	1,342	38,1	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707153	1,342	38,1	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707153	1,342	38,1	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707384	1,342	38,1	FI-FO-008	1	10,74	10,74	0,0029833
707384	1,342	38,1	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707384	1,342	38,1	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707384	1,342	38,1	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707384	1,342	38,1	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707258	1,46	41,28	FI-FO-008	1	11,68	11,68	0,0032444
707258	1,46	41,28	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707258	1,46	41,28	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028

707258	1,46	41,28	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707258	1,46	41,28	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707259	1,46	41,28	FI-FO-008	1	11,68	11,68	0,0032444
707259	1,46	41,28	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707259	1,46	41,28	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707259	1,46	41,28	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707259	1,46	41,28	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707154	1,495	38,1	FI-FO-008	1	11,96	11,96	0,0033222
707154	1,495	38,1	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707154	1,495	38,1	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707154	1,495	38,1	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707154	1,495	38,1	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707155	1,495	38,1	FI-FO-008	1	11,96	11,96	0,0033222
707155	1,495	38,1	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707155	1,495	38,1	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707155	1,495	38,1	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707155	1,495	38,1	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707151	1,574	38,1	FI-FO-008	1	12,59	12,59	0,0034972
707151	1,574	38,1	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707151	1,574	38,1	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707151	1,574	38,1	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707151	1,574	38,1	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707150	1,574	38,1	FI-FO-008	1	12,59	12,59	0,0034972
707150	1,574	38,1	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707150	1,574	38,1	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707150	1,574	38,1	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707150	1,574	38,1	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707163	1,84	41,28	FI-FO-008	1	14,72	14,72	0,0040889
707163	1,84	41,28	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707163	1,84	41,28	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707163	1,84	41,28	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707163	1,84	41,28	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707164	1,84	41,28	FI-FO-008	1	14,72	14,72	0,0040889
707164	1,84	41,28	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707164	1,84	41,28	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707164	1,84	41,28	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707164	1,84	41,28	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707134	1,89	41,28	FI-FO-008	1	15,12	15,12	0,0042
707134	1,89	41,28	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707134	1,89	41,28	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707134	1,89	41,28	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707134	1,89	41,28	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707135	1,89	41,21	FI-FO-008	1	15,12	15,12	0,0042
707135	1,89	41,21	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707135	1,89	41,21	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707135	1,89	41,21	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417

707135	1,89	41,21	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707403	1,92	44,45	FI-FO-008	1	15,36	15,36	0,0042667
707403	1,92	44,45	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707403	1,92	44,45	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707403	1,92	44,45	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707403	1,92	44,45	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707133	1,95	44,45	FI-FO-008	1	15,60	15,6	0,0043333
707133	1,95	44,45	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707133	1,95	44,45	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707133	1,95	44,45	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707133	1,95	44,45	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707393	1,95	44,45	FI-FO-008	1	15,60	15,6	0,0043333
707393	1,95	44,45	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707393	1,95	44,45	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707393	1,95	44,45	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707393	1,95	44,45	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707394	1,95	44,45	FI-FO-008	1	15,60	15,6	0,0043333
707394	1,95	44,45	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707394	1,95	44,45	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707394	1,95	44,45	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707394	1,95	44,45	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707131	1,98	41,28	FI-FO-008	1	15,84	15,84	0,0044
707131	1,98	41,28	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707131	1,98	41,28	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707131	1,98	41,28	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707131	1,98	41,28	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707246	2,2	44,45	FI-FO-008	1	17,60	17,6	0,0048889
707246	2,2	44,45	MH-FO-001	4	2,99	11,96	0,0033222
707246	2,2	44,45	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707246	2,2	44,45	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707246	2,2	44,45	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707223	2,205	44,45	FI-FO-008	1	17,64	17,64	0,0049
707223	2,205	44,45	MH-FO-001	4	2,99	11,96	0,0033222
707223	2,205	44,45	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707223	2,205	44,45	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707223	2,205	44,45	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707260	2,254	44,45	FI-FO-008	1	18,03	18,03	0,0050083
707260	2,254	44,45	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707260	2,254	44,45	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707260	2,254	44,45	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707260	2,254	44,45	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707261	2,254	44,45	FI-FO-008	1	18,03	18,03	0,0050083
707261	2,254	44,45	MH-FO-001	5	2,99	14,95	0,0041528
707261	2,254	44,45	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707261	2,254	44,45	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707261	2,254	44,45	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825

707282	2,302	44,45	FI-FO-008	1	18,42	18,42	0,0051167
707282	2,302	44,45	MH-FO-001	4	2,99	11,96	0,0033222
707282	2,302	44,45	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707282	2,302	44,45	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707282	2,302	44,45	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
707283	2,302	44,45	FI-FO-008	1	18,42	18,42	0,0051167
707283	2,302	44,45	MH-FO-001	4	2,99	11,96	0,0033222
707283	2,302	44,45	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
707283	2,302	44,45	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
707283	2,302	44,45	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825
706034	2,598	34,93	FI-FO-008	1	20,78	20,78	0,0057722
706034	2,598	34,93	MH-FO-001	7	2,99	20,93	0,0058139
706034	2,598	34,93	PE-FO-051	1	6,13	6,13	0,0017028
706034	2,598	34,93	PE-FO-052	1	5,55	5,55	0,0015417
706034	2,598	34,93	PF-FO-016	1	6,57	6,57	0,001825

---

Fonte: Autor (2019)

## APÊNDICE B - QUANTIDADE DE ITENS PRODUZIDOS E HORAS APONTADAS

Mês	Item	Quantidade Produzida	Horas		Totais
			Produtivas	Improdutivas	
JANEIRO	000424	0	0,00	31,28	31,28
JANEIRO	706034	1.211	14,67	5,70	20,37
JANEIRO	707022	831	5,93	5,29	11,21
JANEIRO	707133	630	5,45	3,43	8,88
JANEIRO	707151	1.329	6,52	4,06	10,58
JANEIRO	707152	2.011	11,25	5,72	16,97
JANEIRO	707160	1.108	4,30	1,75	6,05
JANEIRO	707163	1.740	11,60	8,13	19,73
JANEIRO	707169	450	3,54	2,43	5,97
JANEIRO	707255	444	3,35	3,06	6,41
JANEIRO	707363	317	0,00	0,00	0,00
FEVEREIRO	706034	310	3,76	3,02	6,78
FEVEREIRO	707022	6.218	33,63	22,62	56,24
FEVEREIRO	707133	805	5,24	5,38	10,62
FEVEREIRO	707134	4.737	28,11	14,98	43,09
FEVEREIRO	707135	2.487	17,11	14,40	31,51
FEVEREIRO	707151	855	5,36	3,36	8,72
FEVEREIRO	707152	2.679	14,42	16,97	31,38
FEVEREIRO	707160	5.452	38,63	9,32	47,95
FEVEREIRO	707162	530	4,34	1,37	5,71
FEVEREIRO	707163	3.499	21,15	9,38	30,53
FEVEREIRO	707164	365	1,97	0,84	2,81
FEVEREIRO	707169	2.740	21,59	4,00	25,59
FEVEREIRO	707223	990	7,33	4,16	11,49
FEVEREIRO	707258	270	1,57	2,47	4,04
FEVEREIRO	707259	1.303	8,14	5,06	13,20
FEVEREIRO	707282	360	0,71	3,12	3,83
MARÇO	706034	322	3,22	2,02	5,24
MARÇO	707022	1.979	18,44	15,52	33,96
MARÇO	707131	1.107	7,67	2,66	10,33
MARÇO	707133	888	5,26	10,28	15,53
MARÇO	707134	511	3,32	3,34	6,66
MARÇO	707135	3.353	24,38	16,83	41,21
MARÇO	707151	2.622	10,63	13,74	24,37
MARÇO	707152	33	2,25	0,89	3,14
MARÇO	707157	800	6,69	4,34	11,03
MARÇO	707160	8.873	66,25	16,69	82,94
MARÇO	707162	1.390	12,32	4,58	16,90
MARÇO	707163	3.072	16,99	14,22	31,21
MARÇO	707164	2.978	18,30	17,03	35,33
MARÇO	707168	398	2,50	2,02	4,52

MARÇO	707169	1.295	11,04	3,85	14,89
MARÇO	707223	1.194	9,04	5,98	15,02
MARÇO	707249	1.009	7,85	2,61	10,46
MARÇO	707254	256	1,97	1,38	3,35
MARÇO	707260	482	4,27	6,53	10,80
MARÇO	707351	40	0,00	4,14	4,14
MARÇO	707352	25	0,00	5,21	5,21
ABRIL	706034	328	3,07	0,75	3,82
ABRIL	707022	3.956	23,17	11,95	35,12
ABRIL	707131	813	4,71	4,58	9,30
ABRIL	707133	1.473	8,62	5,56	14,18
ABRIL	707134	818	5,07	3,10	8,17
ABRIL	707135	1.769	10,67	14,02	24,69
ABRIL	707152	620	3,47	2,56	6,03
ABRIL	707154	243	1,93	1,92	3,85
ABRIL	707155	516	3,06	1,53	4,59
ABRIL	707157	66	0,66	1,49	2,14
ABRIL	707160	3.965	30,15	7,07	37,22
ABRIL	707162	537	4,39	2,18	6,57
ABRIL	707163	2.333	13,59	13,50	27,09
ABRIL	707164	999	6,97	8,75	15,72
ABRIL	707169	2.073	15,08	6,63	21,71
ABRIL	707223	872	6,88	5,37	12,25
ABRIL	707249	438	2,88	2,87	5,75
ABRIL	707282	550	3,91	2,56	6,48
ABRIL	707283	360	1,55	0,39	1,94
ABRIL	707351	105	1,21	4,98	6,19
ABRIL	707352	121	3,00	5,62	8,62
MAIO	706034	2.143	21,03	10,51	31,55
MAIO	707021	4.349	19,05	14,90	33,95
MAIO	707022	5.578	27,72	20,45	48,17
MAIO	707131	997	6,50	5,78	12,28
MAIO	707133	1.580	9,60	8,93	18,53
MAIO	707134	1.398	7,68	0,86	8,54
MAIO	707135	5.015	29,90	25,10	55,00
MAIO	707151	4.316	23,12	14,67	37,79
MAIO	707152	2.954	16,09	8,60	24,69
MAIO	707153	250	1,37	3,08	4,45
MAIO	707155	430	2,78	1,03	3,81
MAIO	707157	198	1,17	1,52	2,69
MAIO	707160	4.958	34,41	32,04	66,45
MAIO	707162	12	0,00	0,00	0,00
MAIO	707163	4.876	25,86	15,35	41,21
MAIO	707164	951	4,93	3,06	7,98
MAIO	707168	11	0,02	0,55	0,58
MAIO	707223	3.027	19,29	7,36	26,65

MAIO	707246	258	2,03	1,86	3,88
MAIO	707258	269	1,57	1,96	3,53
JUNHO	706034	845	8,24	9,98	18,22
JUNHO	707022	5.868	30,55	24,40	54,95
JUNHO	707133	4	0,00	0,00	0,00
JUNHO	707134	1.056	5,99	3,23	9,22
JUNHO	707135	3.204	19,70	19,86	39,57
JUNHO	707152	3.935	21,61	9,20	30,81
JUNHO	707154	645	4,04	2,29	6,32
JUNHO	707160	7.863	56,04	19,74	75,78
JUNHO	707163	3.578	19,86	9,86	29,72
JUNHO	707164	1.801	10,46	5,80	16,26
JUNHO	707168	245	1,77	1,69	3,46
JUNHO	707169	2.042	16,26	4,08	20,34
JUNHO	707223	1.391	8,18	5,02	13,20
JUNHO	707246	259	2,30	1,36	3,66
JUNHO	707259	1.031	5,33	3,84	9,17
JUNHO	707260	360	2,84	3,50	6,35
JUNHO	707282	0	0,00	0,41	0,41
JUNHO	707283	686	4,51	3,63	8,13
JUNHO	707351	259	0,92	7,52	8,43
JUNHO	707352	288	1,07	5,03	6,10
JULHO	000424	0	0,00	8,92	8,92
JULHO	706034	942	9,03	6,81	15,84
JULHO	707021	926	4,65	3,56	8,20
JULHO	707022	1.414	8,04	6,97	15,00
JULHO	707131	1.000	6,65	5,28	11,93
JULHO	707133	1.007	6,73	4,96	11,70
JULHO	707134	5.905	29,70	9,35	39,05
JULHO	707135	3.344	22,71	18,11	40,83
JULHO	707151	614	3,82	1,47	5,28
JULHO	707152	2.592	16,99	10,37	27,36
JULHO	707153	1.174	6,31	6,00	12,30
JULHO	707154	1.115	7,47	4,19	11,66
JULHO	707163	1.047	6,13	1,36	7,49
JULHO	707164	788	5,78	4,58	10,36
JULHO	707223	2.176	14,21	6,74	20,95
JULHO	707246	363	2,72	3,33	6,05
JULHO	707260	1.283	9,32	12,10	21,41
JULHO	707282	744	5,11	4,84	9,95
JULHO	707352	243	4,31	6,88	11,19
JULHO	707384	258	1,70	2,83	4,54
AGOSTO	000424	27	1,95	26,60	28,56
AGOSTO	706034	313	3,56	3,09	6,65
AGOSTO	707022	107	0,85	2,85	3,70
AGOSTO	707131	2.380	14,63	7,21	21,84

AGOSTO	707133	1.597	11,20	28,47	39,66
AGOSTO	707135	198	1,20	2,66	3,86
AGOSTO	707151	1.000	5,88	4,96	10,84
AGOSTO	707152	3.469	23,51	15,40	38,91
AGOSTO	707155	500	3,96	8,18	12,14
AGOSTO	707164	960	4,84	5,52	10,36
AGOSTO	707168	580	7,42	3,79	11,22
AGOSTO	707169	568	4,22	2,63	6,85
AGOSTO	707223	755	4,38	2,38	6,76
AGOSTO	707249	710	4,84	0,45	5,29
AGOSTO	707254	200	1,88	0,08	1,95
AGOSTO	707255	116	1,08	0,42	1,50
AGOSTO	707258	829	4,32	4,26	8,59
AGOSTO	707260	951	6,61	4,11	10,73
AGOSTO	707283	210	1,36	2,86	4,22
AGOSTO	707351	2.449	20,96	9,39	30,35
AGOSTO	707352	2.283	24,12	24,50	48,62
SETEMBRO	000424	0	0,00	13,75	13,75
SETEMBRO	706034	1.731	18,96	6,63	25,59
SETEMBRO	707131	402	3,34	7,88	11,22
SETEMBRO	707134	1.225	8,21	10,50	18,71
SETEMBRO	707135	2.166	13,90	10,14	24,04
SETEMBRO	707152	1.308	7,36	5,70	13,06
SETEMBRO	707153	926	5,87	3,70	9,57
SETEMBRO	707154	493	3,29	7,64	10,94
SETEMBRO	707164	429	3,06	2,13	5,18
SETEMBRO	707249	900	5,84	1,99	7,83
SETEMBRO	707258	260	1,90	1,83	3,74
SETEMBRO	707351	351	2,21	0,21	2,42
SETEMBRO	707352	1.789	17,49	17,49	34,97
SETEMBRO	707393	44	0,88	3,00	3,88
SETEMBRO	707394	48	0,31	1,95	2,26
OUTUBRO	706034	2.399	26,62	22,04	48,66
OUTUBRO	707021	992	5,05	2,71	7,75
OUTUBRO	707022	3.188	17,65	22,27	39,93
OUTUBRO	707131	1.246	7,99	10,34	18,34
OUTUBRO	707134	240	1,41	2,00	3,41
OUTUBRO	707135	666	4,42	4,04	8,47
OUTUBRO	707150	510	3,51	2,48	5,99
OUTUBRO	707151	485	3,83	3,03	6,86
OUTUBRO	707152	2.235	12,16	7,86	20,02
OUTUBRO	707153	586	2,21	2,92	5,14
OUTUBRO	707164	800	5,78	12,64	18,42
OUTUBRO	707167	727	5,94	3,33	9,27
OUTUBRO	707168	521	3,83	2,62	6,45
OUTUBRO	707169	1.237	10,05	1,98	12,04

OUTUBRO	707223	259	2,74	1,46	4,20
OUTUBRO	707255	879	6,41	13,29	19,70
OUTUBRO	707259	455	2,77	2,24	5,01
OUTUBRO	707351	2.386	17,41	6,40	23,81
NOVEMBRO	706034	447	3,98	1,80	5,78
NOVEMBRO	707022	674	3,78	6,84	10,62
NOVEMBRO	707131	1.745	12,95	11,12	24,08
NOVEMBRO	707134	247	1,41	2,49	3,90
NOVEMBRO	707135	1.132	8,75	6,25	15,00
NOVEMBRO	707151	456	2,45	2,73	5,17
NOVEMBRO	707152	1.263	7,36	2,42	9,78
NOVEMBRO	707153	1.900	8,65	2,08	10,73
NOVEMBRO	707154	632	5,32	8,27	13,59
NOVEMBRO	707163	375	2,18	1,96	4,15
NOVEMBRO	707164	982	6,16	8,76	14,92
NOVEMBRO	707168	384	3,48	4,71	8,19
NOVEMBRO	707223	1.848	12,20	6,13	18,33
NOVEMBRO	707246	219	1,54	0,88	2,42
NOVEMBRO	707258	686	4,74	26,48	31,23
NOVEMBRO	707259	379	2,10	1,61	3,71
NOVEMBRO	707261	259	1,87	2,00	3,87
NOVEMBRO	707282	204	1,62	6,63	8,26
NOVEMBRO	707393	306	1,89	1,68	3,57
NOVEMBRO	707394	302	2,83	2,80	5,63
DEZEMBRO	000424	1	0,01	37,45	37,46
DEZEMBRO	706034	2.483	25,96	9,24	35,20
DEZEMBRO	707133	493	3,43	5,09	8,52
DEZEMBRO	707135	1.455	10,20	4,92	15,11
DEZEMBRO	707151	310	2,20	1,03	3,23
DEZEMBRO	707152	3.597	19,26	12,50	31,76
DEZEMBRO	707164	368	2,09	0,41	2,50
DEZEMBRO	707258	60	0,67	2,97	3,64
DEZEMBRO	707260	301	1,97	1,55	3,52
DEZEMBRO	707283	191	1,71	4,66	6,37
DEZEMBRO	707403	62	0,06	7,24	7,30

---

Fonte: Autor (2019)

### APÊNDICE C - DEMANDA MENSAL POR MÁQUINA DE CADA ITEM

Mês	Item	Demanda Mensal por Máquina				
		FI-FO-008	MH-FO-001	PE-FO-051	PE-FO-052	PF-FO-016
JANEIRO	000424	-	-	-	-	-
JANEIRO	706034	6,990161	7,04061944	2,0620639	1,8669583	2,210075
JANEIRO	707022	2,278325	3,45095833	1,4150083	1,281125	1,516575
JANEIRO	707133	2,73	2,61625	1,07275	0,97125	1,14975
JANEIRO	707151	4,647808	5,51904167	2,2629917	2,048875	2,425425
JANEIRO	707152	5,999483	8,35123611	3,4242861	3,1002917	3,670075
JANEIRO	707160	0	3,68102222	1,8866778	1,7081667	0
JANEIRO	707163	7,114667	7,22583333	2,9628333	2,6825	3,1755
JANEIRO	707169	0	1,86875	0,76625	0	0
JANEIRO	707255	0	1,84383333	0,7560333	0	0
JANEIRO	707363	0	1,05314444	0,5397806	0,4887083	0
FEVEREIRO	706034	1,789389	1,80230556	0,5278611	0,4779167	0,56575
FEVEREIRO	707022	17,04768	25,8219722	10,587872	9,5860833	11,34785
FEVEREIRO	707133	3,488333	3,34298611	1,3707361	1,2410417	1,469125
FEVEREIRO	707134	19,8954	19,6717083	8,0660583	7,302875	8,645025
FEVEREIRO	707135	10,4454	10,3279583	4,2348083	3,834125	4,538775
FEVEREIRO	707151	2,990125	3,550625	1,455875	1,318125	1,560375
FEVEREIRO	707152	7,99235	11,1252917	4,5617417	4,130125	4,889175
FEVEREIRO	707160	0	18,1127556	9,2835444	8,4051667	0
FEVEREIRO	707162	0	1,76077778	0,9024722	0,8170833	0,96725
FEVEREIRO	707163	14,30702	14,5305694	5,9580194	5,3942917	6,385675
FEVEREIRO	707164	1,492444	1,51576389	0,6215139	0,5627083	0,666125
FEVEREIRO	707169	0	11,3786111	4,6656111	0	0
FEVEREIRO	707223	4,851	3,289	1,68575	1,52625	1,80675
FEVEREIRO	707258	0,876	1,12125	0,45975	0,41625	0,49275
FEVEREIRO	707259	4,227511	5,41106944	2,2187194	2,0087917	2,377975
FEVEREIRO	707282	1,842	1,196	0,613	0,555	0,657
MARÇO	706034	1,858656	1,87207222	0,5482944	0,4964167	0,58765
MARÇO	707022	5,425758	8,21834722	3,3697972	3,0509583	3,611675
MARÇO	707131	4,8708	4,597125	1,884975	1,706625	2,020275
MARÇO	707133	3,848	3,68766667	1,5120667	1,369	1,6206
MARÇO	707134	2,1462	2,12206944	0,8701194	0,7877917	0,932575
MARÇO	707135	14,0826	13,9242639	5,7094139	5,1692083	6,119225
MARÇO	707151	9,169717	10,8885833	4,4646833	4,04225	4,78515
MARÇO	707152	0,09845	0,13704167	0,0561917	0,050875	0,060225
MARÇO	707157	2,151111	3,32222222	1,3622222	1,2333333	1,46
MARÇO	707160	0	29,4780778	15,108747	13,679208	0
MARÇO	707162	0	4,61788889	2,3668611	2,1429167	2,53675
MARÇO	707163	12,56107	12,7573333	5,2309333	4,736	5,6064
MARÇO	707164	12,17671	12,3669722	5,0708722	4,5910833	5,43485
MARÇO	707168	0	1,65280556	0,6777056	0	0

MARÇO	707169	0	5,37784722	2,2050972	0	0
MARÇO	707223	5,8506	3,96673333	2,0331167	1,84075	2,17905
MARÇO	707249	0	3,35212222	1,7181028	1,5555417	0
MARÇO	707254	0	1,06311111	0,4359111	0	0
MARÇO	707260	2,414017	2,00163889	0,8207389	0,7430833	0,87965
MARÇO	707351	0	0,36544444	0,0681111	0	0
MARÇO	707352	0	0,22840278	0,0425694	0	0
ABRIL	706034	1,893289	1,90695556	0,5585111	0,5056667	0,5986
ABRIL	707022	10,84603	16,4283889	6,7361889	6,0988333	7,2197
ABRIL	707131	3,5772	3,37620833	1,3843583	1,253375	1,483725
ABRIL	707133	6,383	6,11704167	2,5081917	2,270875	2,688225
ABRIL	707134	3,4356	3,39697222	1,3928722	1,2610833	1,49285
ABRIL	707135	7,4298	7,34626389	3,0122139	2,7272083	3,228425
ABRIL	707152	1,849667	2,57472222	1,0557222	0,9558333	1,1315
ABRIL	707154	0,8073	1,009125	0,413775	0,374625	0,443475
ABRIL	707155	1,714267	2,14283333	0,8786333	0,7955	0,9417
ABRIL	707157	0,177467	0,27408333	0,1123833	0,10175	0,12045
ABRIL	707160	0	13,1726111	6,7515139	6,1127083	0
ABRIL	707162	0	1,78403333	0,9143917	0,827875	0,980025
ABRIL	707163	9,539378	9,68843056	3,9725806	3,5967083	4,257725
ABRIL	707164	4,0848	4,148625	1,701075	1,540125	1,823175
ABRIL	707169	0	8,60870833	3,5298583	0	0
ABRIL	707223	4,2728	2,89697778	1,4848222	1,3443333	1,5914
ABRIL	707249	0	1,45513333	0,7458167	0,67525	0
ABRIL	707282	2,814167	1,82722222	0,9365278	0,8479167	1,00375
ABRIL	707283	1,842	1,196	0,613	0,555	0,657
ABRIL	707351	0	0,95929167	0,1787917	0	0
ABRIL	707352	0	1,10546944	0,2060361	0	0
MAIO	706034	12,36987	12,4591639	3,6490528	3,3037917	3,910975
MAIO	707021	11,92351	18,0604306	7,4053806	6,7047083	7,936925
MAIO	707022	15,29302	23,1641944	9,4980944	8,5994167	10,17985
MAIO	707131	4,3868	4,14031944	1,6976694	1,5370417	1,819525
MAIO	707133	6,846667	6,56138889	2,6903889	2,4358333	2,8835
MAIO	707134	5,8716	5,80558333	2,3804833	2,15525	2,55135
MAIO	707135	21,063	20,8261806	8,5394306	7,7314583	9,152375
MAIO	707151	15,09401	17,9233889	7,3491889	6,6538333	7,8767
MAIO	707152	8,812767	12,2673056	5,0300056	4,5540833	5,39105
MAIO	707153	0,745833	1,03819444	0,4256944	0,3854167	0,45625
MAIO	707155	1,428556	1,78569444	0,7321944	0,6629167	0,78475
MAIO	707157	0,5324	0,82225	0,33715	0,30525	0,36135
MAIO	707160	0	16,4715778	8,4423722	7,6435833	0
MAIO	707162	0	0,03986667	0,0204333	0,0185	0,0219
MAIO	707163	19,93742	20,2489444	8,3027444	7,5171667	8,8987
MAIO	707164	3,888533	3,94929167	1,6193417	1,466125	1,735575
MAIO	707168	0	0,04568056	0,0187306	0	0
MAIO	707223	14,8323	10,0563667	5,1543083	4,666625	5,524275

MAIO	707246	1,261333	0,85713333	0,4393167	0,39775	0,47085
MAIO	707258	0,872756	1,11709722	0,4580472	0,4147083	0,490925
JUNHO	706034	4,877528	4,91273611	1,4388472	1,3027083	1,542125
JUNHO	707022	16,0881	24,3685	9,9919	9,0465	10,7091
JUNHO	707133	0,017333	0,01661111	0,0068111	0,0061667	0,0073
JUNHO	707134	4,4352	4,38533333	1,7981333	1,628	1,9272
JUNHO	707135	13,4568	13,3055	5,4557	4,9395	5,8473
JUNHO	707152	11,73942	16,3411806	6,7004306	6,0664583	7,181375
JUNHO	707154	2,142833	2,67854167	1,0982917	0,994375	1,177125
JUNHO	707160	0	26,1226333	13,388942	12,122125	0
JUNHO	707163	14,63004	14,8586389	6,0925389	5,5160833	6,52985
JUNHO	707164	7,364089	7,47915278	3,0667028	2,7765417	3,286825
JUNHO	707168	0	1,01743056	0,4171806	0	0
JUNHO	707169	0	8,47997222	3,4770722	0	0
JUNHO	707223	6,8159	4,62121111	2,3685639	2,1444583	2,538575
JUNHO	707246	1,266222	0,86045556	0,4410194	0,3992917	0,472675
JUNHO	707259	3,345022	4,28151389	1,7555639	1,5894583	1,881575
JUNHO	707260	1,803	1,495	0,613	0,555	0,657
JUNHO	707282	0	0	0	0	0
JUNHO	707283	3,510033	2,27904444	1,1681056	1,0575833	1,25195
JUNHO	707351	0	2,36625278	0,4410194	0	0
JUNHO	707352	0	2,6312	0,4904	0	0
JULHO	000424	-	-	-	-	-
JULHO	706034	5,437433	5,47668333	1,6040167	1,45225	1,71915
JULHO	707021	2,538783	3,84547222	1,5767722	1,4275833	1,68995
JULHO	707022	3,876717	5,87202778	2,4077278	2,1799167	2,58055
JULHO	707131	4,4	4,15277778	1,7027778	1,5416667	1,825
JULHO	707133	4,363667	4,18184722	1,7146972	1,5524583	1,837775
JULHO	707134	24,801	24,5221528	10,054903	9,1035417	10,776625
JULHO	707135	14,0448	13,8868889	5,6940889	5,1553333	6,1028
JULHO	707151	2,147294	2,54980556	1,0455056	0,9465833	1,12055
JULHO	707152	7,7328	10,764	4,4136	3,996	4,7304
JULHO	707153	3,502433	4,87536111	1,9990611	1,8099167	2,14255
JULHO	707154	3,704278	4,63034722	1,8985972	1,7189583	2,034875
JULHO	707163	4,281067	4,34795833	1,7828083	1,614125	1,910775
JULHO	707164	3,222044	3,27238889	1,3417889	1,2148333	1,4381
JULHO	707223	10,6624	7,22915556	3,7052444	3,3546667	3,9712
JULHO	707246	1,774667	1,20596667	0,6181083	0,559625	0,662475
JULHO	707260	6,425692	5,32801389	2,1846639	1,9779583	2,341475
JULHO	707282	3,8068	2,47173333	1,2668667	1,147	1,3578
JULHO	707352	0	2,220075	0,413775	0	0
JULHO	707384	0,7697	1,07141667	0,4393167	0,39775	0,47085
AGOSTO	000424	-	-	-	-	-
AGOSTO	706034	1,806706	1,81974722	0,5329694	0,4825417	0,571225
AGOSTO	707022	0,293358	0,44434722	0,1821972	0,1649583	0,195275
AGOSTO	707131	10,472	9,88361111	4,0526111	3,6691667	4,3435

AGOSTO	707133	6,920333	6,63198611	2,7193361	2,4620417	2,914525
AGOSTO	707135	0,8316	0,82225	0,33715	0,30525	0,36135
AGOSTO	707151	3,497222	4,15277778	1,7027778	1,5416667	1,825
AGOSTO	707152	10,34918	14,4059861	5,9069361	5,3480417	6,330925
AGOSTO	707155	1,661111	2,07638889	0,8513889	0,7708333	0,9125
AGOSTO	707164	3,925333	3,98666667	1,6346667	1,48	1,752
AGOSTO	707168	0	2,40861111	0,9876111	0	0
AGOSTO	707169	0	2,35877778	0,9671778	0	0
AGOSTO	707223	3,6995	2,50827778	1,2855972	1,1639583	1,377875
AGOSTO	707249	0	2,35877778	1,2089722	1,0945833	0
AGOSTO	707254	0	0,83055556	0,3405556	0	0
AGOSTO	707255	0	0,48172222	0,1975222	0	0
AGOSTO	707258	2,689644	3,44265278	1,4116028	1,2780417	1,512925
AGOSTO	707260	4,762925	3,94929167	1,6193417	1,466125	1,735575
AGOSTO	707283	1,0745	0,69766667	0,3575833	0,32375	0,38325
AGOSTO	707351	0	22,3743361	4,1701028	0	0
AGOSTO	707352	0	20,8577417	3,8874417	0	0
SETEMBRO	000424	-	-	-	-	-
SETEMBRO	706034	9,991717	10,0638417	2,9475083	2,668625	3,159075
SETEMBRO	707131	1,7688	1,66941667	0,6845167	0,61975	0,73365
SETEMBRO	707134	5,145	5,08715278	2,0859028	1,8885417	2,235625
SETEMBRO	707135	9,0972	8,99491667	3,6882167	3,33925	3,95295
SETEMBRO	707152	3,9022	5,43183333	2,2272333	2,0165	2,3871
SETEMBRO	707153	2,762567	3,84547222	1,5767722	1,4275833	1,68995
SETEMBRO	707154	1,637856	2,04731944	0,8394694	0,7600417	0,899725
SETEMBRO	707164	1,754133	1,78154167	0,7304917	0,661375	0,782925
SETEMBRO	707249	0	2,99	1,5325	1,3875	0
SETEMBRO	707258	0,843556	1,07972222	0,4427222	0,4008333	0,4745
SETEMBRO	707351	0	3,206775	0,597675	0	0
SETEMBRO	707352	0	16,3445028	3,0462694	0	0
SETEMBRO	707393	0,190667	0,18272222	0,0749222	0,0678333	0,0803
SETEMBRO	707394	0,208	0,19933333	0,0817333	0,074	0,0876
OUTUBRO	706034	13,84756	13,9475194	4,0849639	3,6984583	4,378175
OUTUBRO	707021	2,719733	4,11955556	1,6891556	1,5293333	1,8104
OUTUBRO	707022	8,740433	13,2390556	5,4284556	4,9148333	5,8181
OUTUBRO	707131	5,4824	5,17436111	2,1216611	1,9209167	2,27395
OUTUBRO	707134	1,008	0,99666667	0,4086667	0,37	0,438
OUTUBRO	707135	2,7972	2,76575	1,13405	1,02675	1,21545
OUTUBRO	707150	1,783583	2,11791667	0,8684167	0,78625	0,93075
OUTUBRO	707151	1,696153	2,01409722	0,8258472	0,7477083	0,885125
OUTUBRO	707152	6,66775	9,28145833	3,8057083	3,445625	4,078875
OUTUBRO	707153	1,748233	2,43352778	0,9978278	0,9034167	1,06945
OUTUBRO	707164	3,271111	3,32222222	1,3622222	1,2333333	1,46
OUTUBRO	707167	0	3,01906944	1,2379194	0	0
OUTUBRO	707168	0	2,16359722	0,8871472	0	0
OUTUBRO	707169	0	5,13698611	2,1063361	0	0

OUTUBRO	707223	1,2691	0,86045556	0,4410194	0,3992917	0,472675
OUTUBRO	707255	0	3,65029167	1,4967417	0	0
OUTUBRO	707259	1,476222	1,88951389	0,7747639	0,7014583	0,830375
OUTUBRO	707351	0	21,7987611	4,0628278	0	0
NOVEMBRO	706034	2,580183	2,59880833	0,7611417	0,689125	0,815775
NOVEMBRO	707022	1,847883	2,79897222	1,1476722	1,0390833	1,23005
NOVEMBRO	707131	7,678	7,24659722	2,9713472	2,6902083	3,184625
NOVEMBRO	707134	1,0374	1,02573611	0,4205861	0,3807917	0,450775
NOVEMBRO	707135	4,7544	4,70094444	1,9275444	1,7451667	2,0659
NOVEMBRO	707151	1,594733	1,89366667	0,7764667	0,703	0,8322
NOVEMBRO	707152	3,76795	5,24495833	2,1506083	1,947125	2,304975
NOVEMBRO	707153	5,668333	7,89027778	3,2352778	2,9291667	3,4675
NOVEMBRO	707154	2,099644	2,62455556	1,0761556	0,9743333	1,1534
NOVEMBRO	707163	1,533333	1,55729167	0,6385417	0,578125	0,684375
NOVEMBRO	707164	4,015289	4,07802778	1,6721278	1,5139167	1,79215
NOVEMBRO	707168	0	1,59466667	0,6538667	0	0
NOVEMBRO	707223	9,0552	6,13946667	3,1467333	2,849	3,3726
NOVEMBRO	707246	1,070667	0,72756667	0,3729083	0,337625	0,399675
NOVEMBRO	707258	2,225689	2,84880556	1,1681056	1,0575833	1,25195
NOVEMBRO	707259	1,229644	1,57390278	0,6453528	0,5842917	0,691675
NOVEMBRO	707261	1,297158	1,07556944	0,4410194	0,3992917	0,472675
NOVEMBRO	707282	1,0438	0,67773333	0,3473667	0,3145	0,3723
NOVEMBRO	707393	1,326	1,27075	0,52105	0,47175	0,55845
NOVEMBRO	707394	1,308667	1,25413889	0,5142389	0,4655833	0,55115
DEZEMBRO	000424	-	-	-	-	-
DEZEMBRO	706034	14,33243	14,4358861	4,2279972	3,8279583	4,531475
DEZEMBRO	707133	2,136333	2,04731944	0,8394694	0,7600417	0,899725
DEZEMBRO	707135	6,111	6,04229167	2,4775417	2,243125	2,655375
DEZEMBRO	707151	1,084139	1,28736111	0,5278611	0,4779167	0,56575
DEZEMBRO	707152	10,73105	14,9375417	6,1248917	5,545375	6,564525
DEZEMBRO	707164	1,504711	1,52822222	0,6266222	0,5673333	0,6716
DEZEMBRO	707258	0,194667	0,24916667	0,1021667	0,0925	0,1095
DEZEMBRO	707260	1,507508	1,24998611	0,5125361	0,4640417	0,549325
DEZEMBRO	707283	0,977283	0,63454444	0,3252306	0,2944583	0,348575
DEZEMBRO	707403	0,264533	0,25747222	0,1055722	0,0955833	0,11315

Fonte: Autor (2019)