

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**APLICAÇÃO DE MONITORAMENTO DE DADOS EM UMA MÁQUINA  
DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE UMA SIDERÚRGICA PARA  
MANUTENÇÃO PREDITIVA**

**DANIEL AURÉLIO DOS SANTOS CASTRO**

JUIZ DE FORA

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**APLICAÇÃO DE MONITORAMENTO DE DADOS EM UMA MÁQUINA  
DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE UMA SIDERÚRGICA PARA  
MANUTENÇÃO PREDITIVA**

**DANIEL AURÉLIO DOS SANTOS CASTRO**

JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA

2020

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Castro, Daniel Aurélio dos Santos.

Aplicação de monitoramento de dados em uma máquina de lingotamento contínuo de uma siderúrgica para manutenção preditiva / Daniel Aurélio dos Santos Castro. -- 2020.

51 p.

Orientador: Luiz Henrique Dias Alves

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2020.

1. Manutenção. 2. Máquina de lingotamento contínuo. 3. Confiabilidade. 4. Weibull. I. Alves, Luiz Henrique Dias, orient. II. Título.

**APLICAÇÃO DE MONITORAMENTO DE DADOS EM UMA MÁQUINA  
DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE UMA SIDERÚRGICA PARA  
MANUTENÇÃO PREDITIVA**

**DANIEL AURÉLIO DOS SANTOS CASTRO**

Trabalho Final de Curso II submetido à banca examinadora constituída de acordo com o Artigo 9º do Capítulo IV das Normas de Trabalho Final de Curso estabelecidas pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em:

Por:

---

Orientador: Dsc., Luiz Henrique Dias Alves

---

Dsc., Carlos Renato Pagotto

---

Douglas de Paula

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Lúcia e Sérgio por todo apoio e confiança no meu progresso.

A todos os meus amigos do curso de graduação que compartilharam dos desafios que passamos.

A todos que contribuíram com a minha carreira profissional, em especial meu supervisor Douglas de Paula por todo apoio e suporte.

A universidade por prover todo apoio. Aos professores que me acompanharam no decorrer dessa jornada. Em especial meu orientador Luiz Henrique pela paciência e confiança no meu projeto.

## RESUMO

Com o crescente nível de competitividade as empresas têm buscado cada vez mais apoio na análise de dados para tomar decisões assertivas. Nesse momento estamos experimentando a quarta revolução industrial que traz consigo sistemas cada vez mais digitais que carregam essa inovação em sua comunicação e operação, essa mudança tem influenciado a maneira com que as pessoas interagem e se comunicam com esses sistemas. Hoje vemos que o próprio componente, equipamento ou sistema é capaz de indicar que a sua saúde está comprometida por meio de suas variáveis de funcionamento. A ideia por trás desse trabalho é obter essas variáveis dos componentes de uma máquina de lingotamento contínuo de uma siderúrgica através de sensores e gerar o armazenamento das mesmas por meio de um sistema PIMS para permitir a melhor execução de manutenção preditiva desses componentes. Almeja-se com esse trabalho verificar o aumento da disponibilidade dos componentes dessa máquina após a implementação desse modo de manutenção preditiva.

**Palavras-chave:** Manutenção, máquina de lingotamento contínuo, confiabilidade, Weibull;

## ABSTRACT

With the increasing level of competitiveness, companies have increasingly sought support in data analysis to make assertive decisions. Right now we are experiencing the fourth industrial revolution that brings increasingly digital systems that carry this innovation in their communication and operation, this change has influenced the way that people interact and communicate with these systems. Today we see that the component, equipment or system itself is capable of indicating that your health is compromised through its operating parameters. The objective of this work is to obtain these parameters from the components of a continuous casting machine of a steel mill through sensors and generate their storage through a PIMS system to allow the best performance of predictive maintenance of these components. The aim of this work is to verify the increased availability of the components of this machine after the implementation of this predictive maintenance.

**Key-words:** Maintenance, continuous casting machine, reliability, Weibull;

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução das expectativas sobre a manutenção Moubray 1997 Adaptado	17
Figura 2 – Visão geral da engenharia de manutenção, Kardec (2009) Adaptado . .	20
Figura 3 – Oito pilares da TPM, Kardec Adaptado . . . . .	21
Figura 4 – Exemplo de curva da banheira, Fogliatto 2011 . . . . .	24
Figura 5 – Representação de confiabilidade da distribuição exponencial, Fogliatto 2011 . . . . .	25
Figura 6 – Representação $h(t)$ para distribuição de Weibull, Fogliatto 2011 . . . .	26
Figura 7 – Função de risco da lognormal, Fogliatto 2011 . . . . .	27
Figura 8 – Processo de lingotamento contínuo Disponível em <a href="http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter2/2j2img.html">www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter2/2j2img.html</a> . . . . .	28
Figura 9 – Desenho esquemático do distribuidor, válvula submersa e molde (Thomas, 2003) . . . . .	29
Figura 10 – Sensores de temperatura do tipo termopar . . . . .	31
Figura 11 – Sensores de temperatura do tipo de resistência . . . . .	32
Figura 12 – Sensores de temperatura do tipo termistor . . . . .	32
Figura 13 – Sensores de temperatura do tipo interruptor bimetálico . . . . .	33
Figura 14 – Sensores capacitivos de deslocamento sem contato . . . . .	33
Figura 15 – Sensores capacitivos de deslocamento sem contato . . . . .	34
Figura 16 – Acelerômetros para medição de vibração . . . . .	34
Figura 17 – Medidores de vazão do tipo rotâmetro . . . . .	35
Figura 18 – Medidores de vazão do tipo eletromagnético . . . . .	35
Figura 19 – Medidores de vazão do tipo ultrassônico . . . . .	36
Figura 20 – Medidores de vazão do tipo coriólis . . . . .	37
Figura 21 – Sensores de rotor . . . . .	37
Figura 22 – Sensores de pressão . . . . .	38
Figura 23 – CLP Siemens Simatic S7-300 <a href="https://new.siemens.com">https://new.siemens.com</a> . . . . .	38
Figura 24 – Detalhes físicos típicos das barras de terminais de entrada e de saída Engenharia de Automação Industrial - MORAES, Cícero couto de . . .	39
Figura 25 – Ciclo de processamento - MORAES, Cícero couto de . . . . .	40
Figura 26 – Conectores dos terminais de E/S na unidade remota e no CLP - MORAES, Cícero couto de . . . . .	41
Figura 27 – Tela de supervisorio lingotamento contínuo - MORAES, Cícero couto de	42
Figura 28 – Lingotamento contínuo do ponto de vista das informações - MORAES, Cícero couto de . . . . .	42
Figura 29 – Conexões do sistema SCADA . . . . .	43
Figura 30 – Tela de supervisorio lingotamento contínuo . . . . .	44

Figura 31 – Gráfico vazão de água no molde . . . . .	45
Figura 32 – Gráfico de corrente do motor . . . . .	45
Figura 33 – Função de densidade de probabilidade . . . . .	47
Figura 34 – Função de taxa de falha . . . . .	47
Figura 35 – Função de sobrevivência . . . . .	48
Figura 36 – Função densidade de probabilidade do Acumulador de barra falsa, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	52
Figura 37 – Função de sobrevivência do Acumulador de barra falsa, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	52
Figura 38 – Função de taxa de falha do Acumulador de barra falsa, Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	52
Figura 39 – Função densidade de probabilidade do CAN, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	53
Figura 40 – Função de sobrevivência do CAN, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	53
Figura 41 – Função de taxa de falha do CAN, Resultado da análise pelo Minitab .	53
Figura 42 – Função densidade de probabilidade da UED, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	54
Figura 43 – Função de sobrevivência da UED, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	54
Figura 44 – Função de taxa de falha da UED, Resultado da análise pelo Minitab .	54
Figura 45 – Função densidade de probabilidade do sistema de instrumentação, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	55
Figura 46 – Função de sobrevivência do sistema de instrumentação, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	55
Figura 47 – Função de taxa de falha do sistema de instrumentação, Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	55
Figura 48 – Função densidade de probabilidade do Leito de resfriamento, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	56
Figura 49 – Função de sobrevivência do Leito de resfriamento, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	56
Figura 50 – Função de taxa de falha do Leito de resfriamento, análise pelo Minitab	56
Figura 51 – Função densidade de probabilidade do conjunto de oxicorte, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	57
Figura 52 – Função de sobrevivência do conjunto de oxicorte, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	57

Figura 53 – Função de taxa de falha do conjunto de oxicorte, Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	57
Figura 54 – Função densidade de probabilidade da mesa de rolos, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	58
Figura 55 – Função de sobrevivência da mesa de rolos, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	58
Figura 56 – Função de taxa de falha da mesa de rolos, Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	58
Figura 57 – Função densidade de probabilidade do sistema de oscilação, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	59
Figura 58 – Função de sobrevivência do sistema de oscilação, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	59
Figura 59 – Função de taxa de falha do sistema de oscilação, Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	59
Figura 60 – Função densidade de probabilidade do TM001, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	60
Figura 61 – Função de sobrevivência do TM001, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	60
Figura 62 – Função de taxa de falha do TM001, Resultado da análise pelo Minitab	60
Figura 63 – Função densidade de probabilidade do TM002, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	61
Figura 64 – Função de sobrevivência do TM002, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	61
Figura 65 – Função de taxa de falha do TM002, Resultado da análise pelo Minitab	61
Figura 66 – Função densidade de probabilidade do TM003, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	62
Figura 67 – Função de sobrevivência do TM003, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab . . . . .	62
Figura 68 – Função de taxa de falha do TM003, Resultado da análise pelo Minitab	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela dos principais equipamentos monitorados . . . . .	30
Tabela 5 – Parâmetros $\beta$ e $\eta$ da distribuição - Elaborado pelo próprio autor . . . .	46
Tabela 2 – Porcentagem de disponibilidade da máquina - Elaborado pelo próprio autor . . . . .	46
Tabela 3 – MTBF da máquina - Elaborado pelo próprio autor . . . . .	46
Tabela 4 – MTTR da máquina - Elaborado pelo próprio autor . . . . .	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PMIS	<i>Project management information system</i>
SDCA	<i>Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados</i>
MCC	<i>Manutenção centrada na confiabilidade</i>
MLC	<i>Máquina de Lingotamento Contínuo</i>
CAN	<i>Controle automático de nível</i>
UED	<i>Unidade de extração e desempenho</i>
TM001	<i>Transferidor de materiais 001</i>
TM002	<i>Transferidor de materiais 002</i>
TM003	<i>Transferidor de materiais 003</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>13</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS . . . . .	13
1.2	JUSTIFICATIVAS . . . . .	13
1.3	ESCOPO DO TRABALHO . . . . .	13
1.4	ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS . . . . .	14
1.5	DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA . . . . .	14
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO . . . . .	14
1.7	CONTEXTO HISTÓRICO E RELEVÂNCIA DO TEMA . . . . .	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA . . . . .</b>	<b>16</b>
2.1	REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .	16
2.2	EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO . . . . .	16
2.3	TIPOS DE MANUTENÇÃO . . . . .	17
2.3.1	MANUTENÇÃO CORRETIVA . . . . .	17
2.3.2	MANUTENÇÃO PREVENTIVA . . . . .	18
2.3.3	MANUTENÇÃO PREDITIVA . . . . .	18
2.3.4	MANUTENÇÃO DETECTIVA . . . . .	19
2.3.5	ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO . . . . .	19
2.4	GESTÃO DA MANUTENÇÃO . . . . .	20
2.4.1	MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL (TPM) . . . . .	20
2.4.2	MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (RCM) . . . . .	22
2.5	CONFIABILIDADE . . . . .	23
2.5.1	TEMPO ATÉ A FALHA . . . . .	23
2.5.2	FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE, $R(t)$ . . . . .	23
2.5.3	FUNÇÃO DE RISCO $h(t)$ . . . . .	24
2.5.4	TEMPO MÉDIO ATÉ FALHA, MTTF . . . . .	24
2.6	DISTRIBUIÇÕES DE TEMPOS ATÉ FALHA . . . . .	25
2.6.1	DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL . . . . .	25
2.6.2	DISTRIBUIÇÃO WEIBULL . . . . .	26
2.6.3	DISTRIBUIÇÃO GAMMA . . . . .	27
2.6.4	DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL . . . . .	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>28</b>
3.1	MÉTODO . . . . .	28
3.1.1	MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO . . . . .	28

3.1.2	ÁRVORE LÓGICA . . . . .	30
3.1.3	SENSORES . . . . .	30
3.1.4	COLETA DE DADOS . . . . .	38
3.1.5	SISTEMA DE SUPERVISÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS . . . . .	41
3.1.6	PIMS . . . . .	43
3.1.7	ANÁLISE PREDITIVA . . . . .	44
<b>4</b>	<b>RESULTADO . . . . .</b>	<b>45</b>
4.1	RESULTADOS ALCANÇADOS . . . . .	45
4.1.1	DISCUSSÃO ACERCA DOS RESULTADOS ENCONTRADOS . . . . .	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>51</b>
	<b>ANEXO A – DADOS DE CONFIABILIDADE DOS COMPO- NENTES . . . . .</b>	<b>52</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A manutenção tem um impacto considerável na produtividade de uma empresa, sendo ela um fator decisivo para que a mesma seja competitiva em um mercado globalizado e cada vez mais competitivo.

Nesse cenário em que o papel da manutenção têm se tornado cada vez mais estratégico para as empresas, a evolução das ferramentas de manutenção garante uma maior confiabilidade dos equipamentos, minimizando a perda de produtividade, defeitos em produtos e paradas inesperadas, situações que comprometem a eficiência do negócio da empresa.

Recursos mal mantidos podem causar instabilidade e interromper parcialmente ou totalmente a produção. Máquinas com defeito ou quebras completas podem se tornar um processo caro para a maior parte das empresas.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

As práticas de manutenção são de extrema importância para as empresas e são também, um campo onde a engenharia mecânica encontra um papel de enorme relevância.

A manutenção preditiva é uma das tecnologias promissoras que vem junto com a quarta revolução industrial. A adoção da manutenção preditiva permite que as empresas reduzam o tempo de parada dos equipamentos, aumentem a segurança em seus processos, elevem a renda e consigam desenvolver novos modelos de negócio.

Embora as promessas em torno dessa tecnologia sejam extensas, a taxa de adoção dessa tecnologia ainda é relativamente lenta. Alguns dos motivos é o caráter multidisciplinar e a ideia em torno dessa tecnologia de ser excessivamente simples de ser implementada.

Assim sendo, a manutenção preditiva é uma tecnologia muito relevante para as empresas. No entanto, necessitam de grande apoio técnico, que pode ser fornecido pela engenharia mecânica.

## 1.3 ESCOPO DO TRABALHO

Esse trabalho irá abordar a implantação de aquisição de dados de maneira contínua, para utilização em análises de manutenção preditiva, em uma máquina de lingotamento contínuo.

A proposta é aplicar técnicas de manutenção preditiva a partir desses dados, visando reduzir o índice de paradas não esperadas e aumento de confiabilidade da máquina.

#### 1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principal objetivo implementar o monitoramento das variáveis de funcionamento dos equipamentos críticos em uma máquina de lingotamento contínuo, permitindo a realização de uma análise de manutenção preditiva. A implantação será feita gradativamente, em etapas.

Para alcançar o objetivo principal o trabalho será dividido da seguinte maneira:

- Definição dos componentes monitorados: A máquina de lingotamento contínuo será decomposta em seus principais componentes;
- Sensores dos componentes críticos: Os componentes serão monitorados por meio de sensores que irão coletar variáveis críticas de seu funcionamento;
- Coleta de dados: A coleta de variáveis dos sensores será feita por meio de um sistema SCADA, por intermédio de um CLP;
- Alimentação do PIMS: O sistema PIMS será alimentado a partir dos dados que o sistema supervisório irá obter, sendo assim possível a criação de um banco de dados com o que for fornecido;
- Análise de confiabilidade: Por meio de análises estatística com dados do histórico de falhas e das variáveis obtidas, serão cruzadas informações para se trabalhar a manutenção preditiva;

#### 1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

O estudo realiza uma abordagem prática realizada na máquina de lingotamento contínuo. Essa abordagem foi fundamentada com base tecnológica proveniente da literatura explorada durante o desenvolvimento do trabalho.

A pesquisa desse trabalho pode ser considerada aplicada de natureza exploratória.

Através dos dados obtidos, foi possível utilizar-se de técnicas estatísticas para gerir a confiabilidade do sistema.

#### 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é decomposto em cinco capítulos, introdução, revisão da literatura, metodologia, resultados e conclusão.

A introdução mostra quais são os principais objetivos deste trabalho, a relevância deste tema, o escopo do trabalho e as razões que justifiquem a realização desse trabalho.

No capítulo de revisão da literatura serão abordadas os principais conceitos utilizados, que foram extraídos de bibliografias e pesquisas relevantes para o tema. A partir dos conceitos definidos nessa seção, o trabalho será fundamentado.

Na metodologia é exposto como o trabalho foi realizado e as tecnologias utilizadas para atender o objetivo.

No capítulo dos resultados são mostrados todos os resultados alcançados por esse trabalho. Na conclusão é feita uma comparação entre os objetivos e o que foi de fato alcançado.

## 1.7 CONTEXTO HISTÓRICO E RELEVÂNCIA DO TEMA

O termo indústria 4.0 nos últimos anos têm se tornado um dos tópicos mais discutidos nas universidades e companhias ao redor do mundo. Mesmo que seja difícil definir com êxito o conceito de indústria 4.0, não é difícil de dizer que essa é a melhor definição para a indústria avançada de hoje. O termo de indústria 4.0 procede o conceito de indústria 3.0 que se iniciou em meados de 1970, nessa época a revolução ficou marcada pelos adventos vindos dos avanços eletrônicos e de tecnologia de informação. A indústria de hoje é marcada por características como, IOT, fábrica inteligente, produto inteligente, big data, dados em nuvem, sistema ciber-físico e outros termos que definem basicamente uma planta inteligente, cada vez mais versátil e de alta confiabilidade.

A confiabilidade de um equipamento ou sistema depende diretamente das informações que se dispõe do mesmo, quando olhamos para o cérebro humano vemos que ele incapaz de arquivar todas as informações necessárias para manter a alta confiabilidade da maior parte dos sistemas de uma indústria de alta confiabilidade. Uma indústria de alta performance não fica à mercê do cérebro humano para captar e processar tais informações, hoje as plantas de alta confiabilidade contam com sistemas que são capazes de coletar todas as informações críticas pertinentes em seus processos, cruzar informações apresentando ideias que lhe trarão certamente os benefícios esperados.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados conceitos e definições da manutenção que servirão de base para o trabalho. Este capítulo apresenta a base teórica para a concepção do trabalho.

### 2.2 EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO

Recentemente a gestão manutenção tem passado por diversas mudanças. Isso é consequência de alguns fatores como o aumento do número e diversidade dos itens físicos que são mantidos, projetos têm se tornado cada vez mais complexos, constantemente surgem novas técnicas de manutenção e novos enfoques sobre a organização da manutenção e suas responsabilidades. Tudo isso têm puxado o desenvolvimento da manutenção nos últimos anos de maneira acelerada.

Pode-se definir a manutenção em grandes etapas no decorrer de sua evolução.

A primeira geração abrange o período antes da segunda guerra mundial. Naqueles dias a indústria não era muito mecanizada, então o tempo de parada não importava muito (Moubray 1997). Durante essa época não havia necessidade de uma manutenção sistematizada, apenas serviços de limpeza, lubrificação e reparo após a quebra. Nesse momento a principal competência buscada era a capacidade do executante em realizar o reparo quando necessário.

A segunda geração ocorre entre os anos 50 e 70 do século passado. As pressões do período da guerra aumentaram a demanda por todo tipo de produtos, ao mesmo tempo em que o contingente de mão de obra industrial diminuiu sensivelmente. Como consequência, naquele período houve forte aumento da mecanização, bem como da complexidade das instalações industriais (Kardec 2009)

Com o crescimento da dependência de disponibilidade, os índices de parada começaram a ser avaliados com maior critério. Nesse momento surgiram as primeiras técnicas preventivas, visando a antecipar a ocorrência de falhas. O custo da manutenção começou a ser avaliado com mais seriedade nesse momento.

A terceira geração é definida pela alta necessidade de confiabilidade e disponibilidade, preservação do meio ambiente e relação custo-benefício.

Nas décadas de 1960 e 1970, o índice de parada era uma grande preocupação em setores da mineração, manufatura e transporte. Na manufatura, os efeitos de paradas não programadas são agravadas pelo tendência mundial em direção ao sistema just-in-time,

onde redução de estoques de trabalho significam que o menor índice de parada é capaz de parar toda a planta (Moubray 1997).

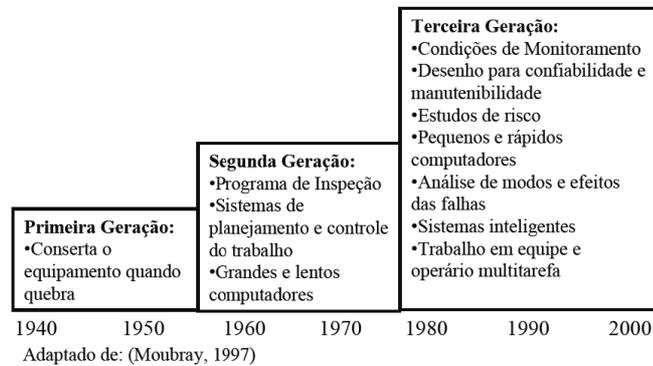


Figura 1 – Evolução das expectativas sobre a manutenção Moubray 1997 Adaptado

A quarta geração é marcada pelo aumento da manutenção preditiva, minimização das manutenções preventiva e corretiva não planejada, análise de falhas e engenharia de manutenção.

Com o objetivo de intervir cada vez menos na planta, as práticas de manutenção preditiva e monitoramento de condição de equipamentos e do processo são cada vez mais utilizadas. Em consequência de redução na aplicação da manutenção preventiva ou programada, desde que ela promove a paralisação dos equipamentos e sistemas, impactando negativamente a produção (Kardec, 2009).

## 2.3 TIPOS DE MANUTENÇÃO

As principais abordagens utilizadas na prática de manutenção serão tema dessa seção.

### 2.3.1 MANUTENÇÃO CORRETIVA

A NBR 5462 define manutenção corretiva como "Manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.". Essa abordagem de manutenção subdivide-se em duas categorias: Planejada e não planejada.

- Manutenção corretiva não planejada: Esse tipo de manutenção acontece após a falha ou perda de desempenho de um equipamento, sem que haja tempo para a preparação dos serviços. Esse tipo de manutenção, que apesar de todos os transtornos, ainda é muito praticada atualmente (Trojan, 2013). Segundo Kardec (2009), a manutenção corretiva não

planejada é caracterizada pela "atuação da manutenção em fato já ocorrido, seja este uma falha ou um desempenho inferior ao esperado".

- Manutenção corretiva Planejada: É a correção do desempenho menor do que o esperado ou da falha, por decisão gerencial, isto é, pela atuação em função de acompanhamento preditiva ou ou pela decisão de operar até a quebra (Kardec, 2009).

A manutenção corretiva não planejada não possui tempo para a preparação de componentes e nem de planejar o serviço, ou seja, esse tipo de manutenção é a correção da falha de modo aleatório a fim de evitar outras consequências (WILLIANS, 1994 apud CASTELLA, 2001). Normalmente este tipo de manutenção implica em altos custos, pois a quebra inesperada provoca perdas de operação, perda de qualidade do produto e elevados custos indiretos de operação (Kardec 2009).

Quando não possui planejamento e informação sofre mais com os prejuízos vindo da manutenção corretiva não planejada, trazendo transtornos como insegurança, parada no processo produtivo, aumentando os custos ocasionando assim atrasos na entrega aos clientes. Já a manutenção corretiva planejada é uma correção que se realiza em função de um acompanhamento preditivo, detectivo, ou até pela decisão gerencial de se operar até a falha. Normalmente baseia-se na modificação dos parâmetros de condição observados pela manutenção preditiva (Kardec, 2009).

### 2.3.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

De acordo com a Abraman, "a manutenção preventiva tem por objetivo eliminar ou reduzir a probabilidade de falhas. Este tipo de manutenção é realizado mediante paradas periódicas para as intervenções, com conseqüente influência nos custos de manutenção e de parada da produção."

Geralmente esse tipo de manutenção é utilizado quando torna-se inviável o uso de preditiva, quando questões de segurança estão em jogo, quanto à troca de algum componente, quando vislumbra-se a oportunidade de ação em um equipamento crítico e de fácil acesso, quando há riscos de agressão ao meio ambiente e quando trata-se de sistemas de alta complexidade ou de produção contínua.

É levado também em consideração o impacto no custo que uma falha do equipamento pode gerar, tal como o impacto da falha na produção.

### 2.3.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA

Segundo Kardec, a manutenção preditiva, também conhecida por Manutenção sob Condição ou Manutenção com Base no Estado do Equipamento, pode ser definida

da seguinte forma: "É a atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática."

Um programa de manutenção preditiva pode minimizar o número de quebras de todos os equipamentos mecânicos da planta industrial e assegurar que o equipamento reparado esteja em condições mecânicas aceitáveis. Ele pode identificar problemas da máquina antes que se tornem sérios já que a maioria dos problemas mecânicos podem ser minimizados se forem detectados e reparados com antecedência. Os modos normais de falha mecânica degradam-se em uma velocidade diretamente proporcional a sua severidade; portanto, quando um problema é detectado logo, normalmente pode-se evitar maiores reparos (Almeida, 2000)

#### 2.3.4 MANUTENÇÃO DETECTIVA

A manutenção detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção ou comando, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação ou manutenção (Kardec, 2009). Na manutenção detectiva, o diagnóstico é obtido de forma direta a partir do processamento das informações colhidas junto à planta. Cada vez mais são utilizados computadores com instrumentação e controle de processo nos mais diversos. São utilizados sistemas de aquisição de dados, SDCA, controladores lógicos programáveis, sistemas digitais de controle distribuído e outros tipos de arquiteturas e controle.

Para Kardec e Nascif (2009), de uma forma ou de outra, a redução dos níveis de paradas indesejadas por manutenções não programadas fica extremamente reduzida. Após a implantação da manutenção detectiva, é necessário melhorar ainda mais a competitividade de uma organização e, para isso, surge a necessidade da implantação de uma Engenharia de Manutenção para solucionar problemas crônicos, melhorando a sistemática aumentando a manutenibilidade de uma empresa.

#### 2.3.5 ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO

O papel da função da engenharia de manutenção é de natureza mais tática, garantindo que os ativos dentro da planta atendam às demandas atuais a empresa. De acordo com Kardec(2009), a engenharia de manutenção significa perseguir benchmarks, aplicar técnicas modernas, estar nivelado com a manutenção do primeiro mundo.

Para Kardec (2009) as principais atribuições da engenharia de manutenção estão:

- Aumentar a confiabilidade.
- Aumentar a disponibilidade.

- Melhorar a manutenibilidade.
- Aumentar a segurança.
- Eliminar problemas crônicos.
- Solucionar problemas tecnológicos.
- Melhorar a capacitação do pessoal.
- Gerir materiais e sobressalentes.
- Participar de novos projetos (interface com a engenharia).
- Dar suporte à execução.
- Fazer análise de falhas e estudos.
- Elaborar planos de manutenção e de inspeção e fazer sua análise crítica.
- Acompanhar os indicadores.
- Zelar pela documentação técnica.



Figura 2 – Visão geral da engenharia de manutenção, Kardec (2009) Adaptado

## 2.4 GESTÃO DA MANUTENÇÃO

### 2.4.1 MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL (TPM)

Para Tavares, o conceito básico do TPM é a reformulação e a melhoria da estrutura empresarial a partir da reestruturação e melhorias das pessoas e equipamentos, com envolvimento de todos os níveis hierárquicos e a mudança da postura organizacional.

TPM é um sistema que foi desenvolvido no Japão para eliminar perdas, reduzir paradas, garantir a qualidade e redução de custos. A TPM exige participação de todos os elementos da cadeia operativa, desde o operador do equipamento, passando pelos elementos da manutenção e pelas chefias intermédias, até aos níveis superiores de gestão.

Em harmonia com a definição do TPM, cada letra possui um significado próprio, como segue (Nakajima, 1989):

- A letra "T"significa "TOTAL". Total no sentido de eficiência global, no sentido de ciclo de vida útil do sistema de produção e no sentido de todos os departamentos e de participação;
- A letra "P"significa "PRODUCTIVE". A busca do sistema de produção até o limite máximo da eficiência, atingindo "zero acidente, zero defeito e quebra/falha zero", ou seja, a eliminação de todos os tipos de perda até chegar ao nível zero.
- A letra "M"significa "MAINTENANCE". Manutenção no sentido amplo, que tem como objeto o ciclo total de vida útil do sistema de produção e designa a manutenção que tem como objeto o sistema de produção de processo único, a fábrica e o sistema de vendas.

De acordo com Kardec (2009) a TPM se apoia sobre oito pilares, que estabelecem um sistema para se atingir maior eficiência produtiva:

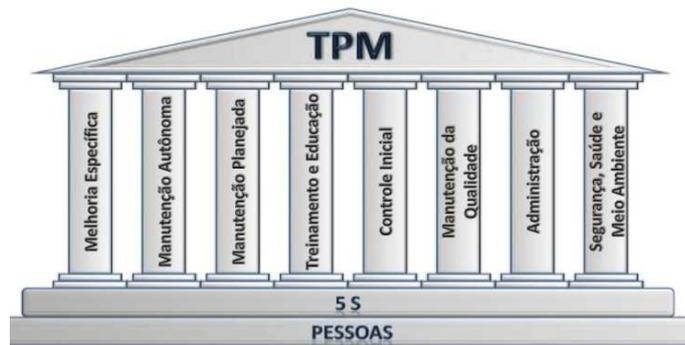


Figura 3 – Oito pilares da TPM, Kardec Adaptado

1. Melhoria Focada: Como o próprio nome indicada, é focar a melhoria global do negócio. Desse modo, procura-se reduzir os problemas para melhorar o desempenho.
2. Manutenção autônoma: Autogerenciamento e controle, liberdade de ação, elaboração e cumprimento de padrões, conscientização da filosofia da TPM.
3. Manutenção planejada: Significa ter realmente o planejamento e o controle da manutenção, o que implica treinamento em técnicas de planejamento (Software), utilização de um sistema mecanizado de planejamento da programação diária e do planejamento de paradas.
4. Educação e treinamento: Ampliação da capacitação técnica, gerencial, comportamental do pessoal de manutenção e operação.

5. Controle inicial: Estabelecimento de um sistema de gerenciamento da fase inicial para novos projetos/equipamentos.  
Eliminar falhas no nascedouro, implantar sistemas de monitoração.
6. Manutenção da qualidade: Estabelecimento de um programa de zero defeito.
7. TPM Office: Estabelecimento de um programa de TPM nas áreas administrativas, visando o aumento de sua eficiência.
8. Segurança ou SHE: Estabelecimento de um sistema de saúde, segurança e meio ambiente.

#### 2.4.2 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (RCM)

De acordo com Fogliatto (2011), a manutenção centrada em confiabilidade, MCC, pode ser definida como um programa que reúne várias técnicas de engenharia para assegurar que os equipamentos e uma planta fabril continuarão realizando as funções especificadas.

Para Moubray (1997), existem sete questões básicas que devem ser contempladas pelos programas de MCC:

1. Quais as funções e padrões de desempenho esperados para os equipamentos fabris?
2. De que modo os equipamentos podem falhar em cumprir suas funções?
3. O que causa cada falha funcional?
4. O que acontece quando cada falha ocorre?
5. De que forma cada falha interessa?
6. O que pode ser feito para prevenir ou impedir cada falha?
7. O que deve ser feito quando não pode ser estabelecida uma atividade pró-ativa pertinente?

A definição das funções e padrões de desempenho dos equipamentos fabris estabelece a base de trabalho do programa de MCC. Todos devem compreender o que é esperado de cada equipamento, as funções que ele deve cumprir e o padrão de desempenho que deve ser mantido durante sua vida útil. Todas essas funções devem ser devidamente identificadas para direcionar o programa de MCC (Fogliatto, 2011).

## 2.5 CONFIABILIDADE

Pode-se definir confiabilidade como a probabilidade de sobrevivência até um tempo  $t$  de uma unidade.

A probabilidade é um conceito da estatística e, segundo Kardec, pode ser definida como: "Relação entre o número de casos favoráveis e o número de casos possíveis, para um intervalo de tempo  $t$ , ou seja:

$$\frac{\text{Número de casos favoráveis}}{\text{Número de casos possíveis}} \leq 1$$

Por tempo até falha de uma unidade entende-se o tempo transcorrido desde o momento em que a unidade é colocada em operação até a sua primeira falha. O tempo até a falha é interpretado como uma variável aleatória não-negativa, designada  $T$ .

As três medidas de confiabilidade mais comumente usadas são a função de confiabilidade  $R(t)$ , a função de risco  $h(t)$  e o tempo médio até falha, MTTF.

### 2.5.1 TEMPO ATÉ A FALHA

Por tempo até falha de uma unidade entende-se o tempo transcorrido desde o momento em que a unidade é colocada em operação até a sua primeira falha.

O tempo até a falha nem sempre é medido de forma contínua, podendo assumir valores discretos, como número de ciclos até falha.

Pressupõe-se uma variável  $T$  distribuída continuamente, com densidade de probabilidade dada por  $f(t)$  e função de distribuição dada por:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u) du \quad t > 0$$

A função  $F(t)$  denota, assim, a probabilidade de falha da unidade em uma missão de duração menor ou igual a  $t$ . A densidade de probabilidade  $f(t)$  é definida como:

$$f(t) = F'(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t}$$

### 2.5.2 FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE, $R(t)$

A função de confiabilidade  $R(t)$  informa a probabilidade de a unidade apresentar sucesso na operação no intervalo de tempo e ainda estar funcionando no tempo  $t$ .

Considerando a variável aleatória  $T$  definida anteriormente, a função de confiabilidade em um tempo  $t$  pode ser expressa como:

$$R(t) = P(T > t)$$

A função de distribuição e  $T$ ,  $F(t)$ , é o complemento de  $R(t)$ , ou seja:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u) du \int_t^{+\infty} f(u) du$$

### 2.5.3 FUNÇÃO DE RISCO $h(t)$

A função de risco  $h(t)$  pode ser considerada a medida de confiabilidade mais difundida na prática. Tal função pode ser interpretada como a quantidade de risco associada a uma unidade no tempo  $t$ . A função de risco é também conhecida em confiabilidade como taxa de falha ou taxa de risco. A função de risco pode ser derivada usando probabilidade condicional. Considere, inicialmente, a probabilidade de falha entre  $t$  e  $t + \Delta t$ , dada por:

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t | T \geq t) = \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t)}{P(T \geq t)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)}$$

De acordo com Fogliatto, existem três classificações básicas para a função de risco: (i) função de risco crescente, em que a incidência de risco cresce com o tempo; (ii) função de risco decrescente, em que a incidência de risco decresce com o tempo; e (iii) função de risco constante ou estacionária, em que a unidade está exposta a uma mesma quantidade de risco em qualquer momento de tempo. É comum que os produtos manufacturados apresentem essas três classificações, conhecida como curva da banheira.

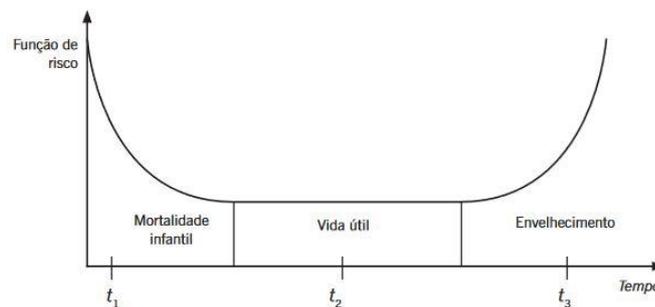


Figura 4 – Exemplo de curva da banheira, Fogliatto 2011

### 2.5.4 TEMPO MÉDIO ATÉ FALHA, MTTF

O tempo médio até falha de uma unidade, MTTF, pode ser definido como:

$$MTTF = E(T) = \int_0^{+\infty} t f(t) dt$$

Trata-se do valor esperado da variável T. Uma expressão alternativa pode ser obtida:

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

## 2.6 DISTRIBUIÇÕES DE TEMPOS ATÉ FALHA

Segundo Fogliatto (2011) as quatro distribuições de probabilidade frequentemente utilizadas para descrever tempo até falha de componentes e sistemas são a Exponencial, Weibull, Gama e Lognormal.

### 2.6.1 DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL

A distribuição exponencial se caracteriza por ter uma função de taxa de falha constante, é a única com esta propriedades. Ela é considerada uma das mais simples em termos matemáticos, e tem sido usada extensivamente como um modelo para o tempo de vida de certos componentes e sistemas.

Suas representações de confiabilidade, para  $t \geq 0$ , são apresentadas abaixo.

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

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

$$h(t) = \lambda$$

$$MTTF = E[T] = \frac{1}{\lambda}$$

Em que,  $\lambda$  é o parâmetro de taxa da distribuição.

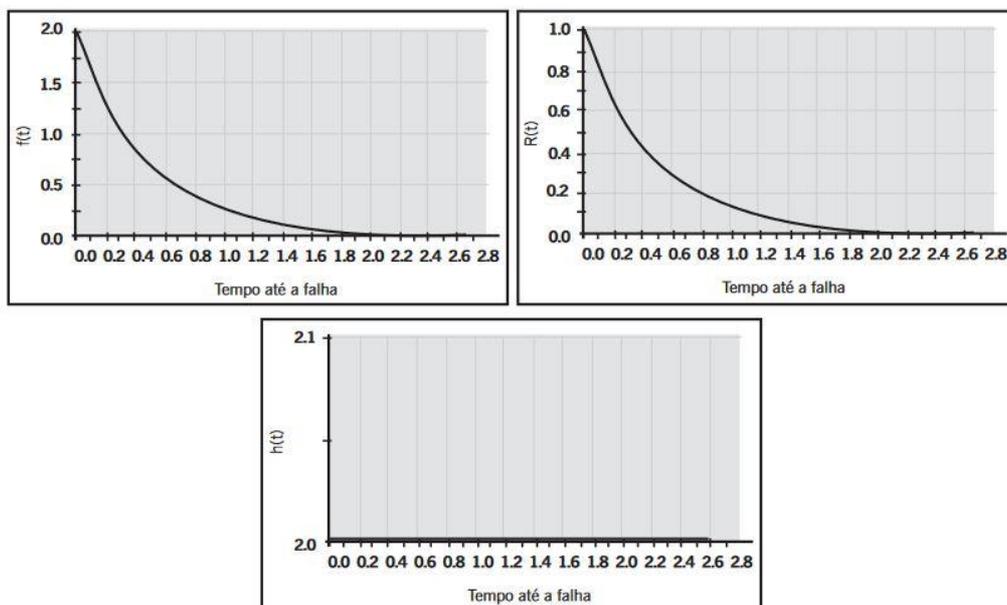


Figura 5 – Representação de confiabilidade da distribuição exponencial, Fogliatto 2011

## 2.6.2 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL

Proposta originalmente por Waloddi Weibull em 1954, em estudos relacionados ao tempo de falha devido a fadiga de metais. É apropriada na modelagem de tempos até falha apresentando funções de risco constante, estritamente crescente e estritamente decrescente. Trata-se de uma das distribuições mais importantes na modelagem de confiabilidade devido à sua flexibilidade e capacidade de representação de amostras de tempos até falha com comportamentos distintos. Na análise de amostras de tempos até falha de tamanho pequeno, supor dados seguindo uma distribuição de Weibull costuma ser um bom ponto de partida para análise (Fogliatto, 2011).

As representações de confiabilidade da Weibull, para  $t \geq 0, \gamma$

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

$$R(t) = e^{-\frac{t^{\lambda}}{\theta}}$$

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

$$MTTF = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)$$

A distribuição de Weibull modela adequadamente uma ampla variedade de situações em que unidades apresentam funções de risco distintas. O tipo de função de risco da Weibull é definido pelo seu parâmetro de forma. Quando  $\gamma < 1$ ,  $h(t)$  é decrescente. Quando  $\gamma = 1$ ,  $h(t)$  é constante e a Weibull transforma-se na distribuição exponencial. Quando  $\gamma > 1$ ,  $h(t)$  é crescente.

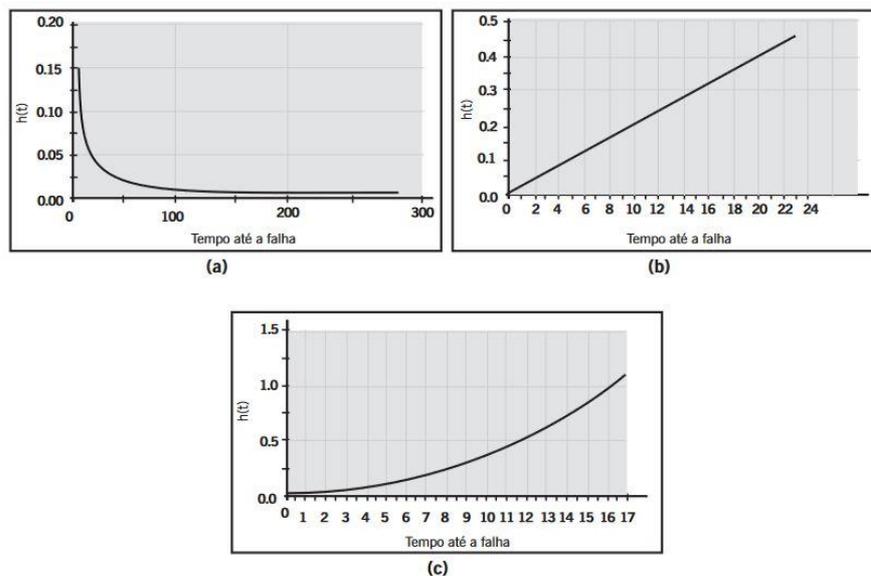


Figura 6 – Representação  $h(t)$  para distribuição de Weibull, Fogliatto 2011

### 2.6.3 DISTRIBUIÇÃO GAMMA

A distribuição gama é uma das mais gerais distribuições, pois diversas distribuições são caso particular dela como por exemplo a exponencial. Essa distribuição tem como suas principais aplicações à análise de tempo de vida de produtos.

As medidas de confiabilidade de interesse para a distribuição gama são parâmetro de forma  $\gamma > 0$  e parâmetro de escala  $\lambda > 0$ .

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\gamma)} (\lambda t)^{\gamma-1} e^{-\lambda t}$$
$$R(t) = 1 - \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^{\lambda t} x^{\gamma-1} e^{-x} dx$$
$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$
$$MTTF = \frac{\gamma}{\lambda}$$

### 2.6.4 DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL

Assim como a distribuição Weibull, a distribuição LogNormal é muito usada para caracterizar tempo de vida de produtos e materiais.

As medidas de confiabilidade de interessa para a distribuição lognormal são ( $t \geq 0$ )

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

$$R(t) = \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)$$

$$h(t) = \frac{\phi[(\mu - \ln t)/(\sigma)]/\sigma t}{\Phi[(\mu - \ln t)/\sigma]}$$

$$MTTF = e^{(\mu + \sigma^2)/2}$$

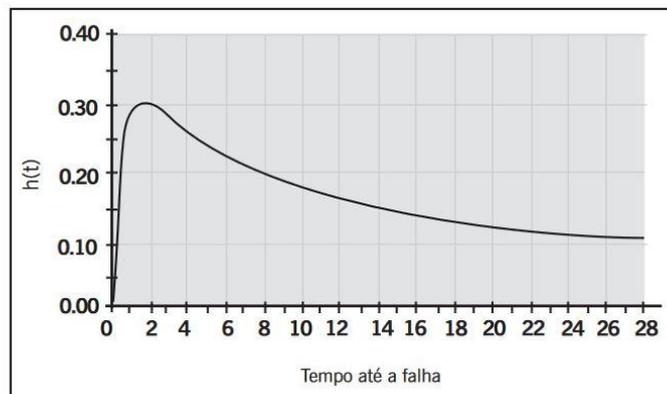


Figura 7 – Função de risco da lognormal, Fogliatto 2011

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 MÉTODO

Neste capítulo será feita uma breve apresentação da máquina de lingotamento contínuo, onde se realizou a análise preditiva. Nessa seção contém também uma explicação detalhada dos métodos utilizados para possibilitar a coleta de dados e posterior realização da análise.

##### 3.1.1 MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO

A máquina de lingotamento garante a solidificação adequada do aço líquido proveniente dos fornos convertedores. Esse processo é contínuo e confere maior produtividade no processo.

O processo de lingotar compreende no vazamento do líquido em um molde de cobre refrigerado a água para que se obtenha o tarugo ou placa em forma desejada.

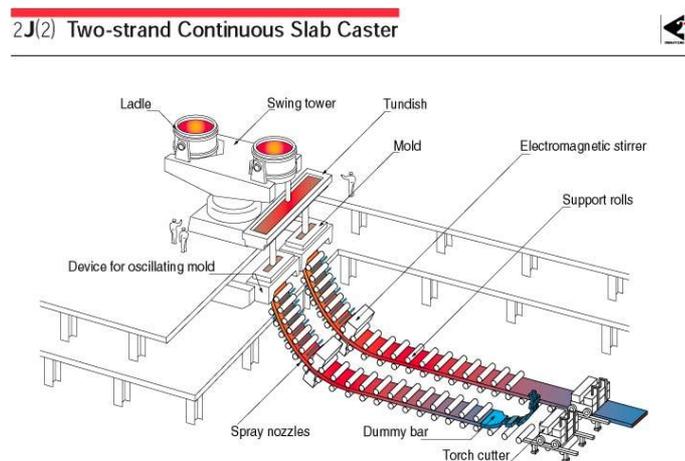


Figura 8 – Processo de lingotamento contínuo

Disponível em [www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter2/2j2i mg.html](http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter2/2j2i mg.html)

O processo se inicia com a transferência da panela com aço líquido proveniente dos fornos convertedores para a torre giratória. A panela é um vaso metálico com revestimento refratário. Sua função é servir de reservatório do aço líquido, sendo utilizada nas diferentes etapas de processo, como a descarbonização, adição de ligas feitas em um forno panela.

Quando a panela é acoplada a torre de giro, acima do distribuidor dá-se início a alimentação do aço ao distribuidor.

Distribuidor é um equipamento intermediário entre a panela e o molde, utilizado como reservatório. O distribuidor pode contar com diferentes números de veios para

lingotamento de placas e tarugos, na figura 9 é possível ver dois veios no distribuidor. O principal objetivo do distribuidor é distribuir o aço para o molde, além de manter a operação contínua nos momentos de troca de panela. O distribuidor também pode ser utilizado para realização ajustes na composição química, bem como para promover a remoção de inclusões (BARBOSA, 2002).

O molde é utilizado para extração de calor do aço líquido, provocando a solidificação de uma camada fina, que deve ter espessura suficiente para que não ocorra o rompimento do veio. As paredes do molde são refrigeradas com água e geralmente são feitos de ligas de cobre para permitir uma rápida transferência de calor da peça sendo lingotada.

Entre o distribuidor e o molde se encontra a válvula submersa, ou válvula gaveta, utilizada para conexão direta do aço entre os dois equipamentos sem que o mesmo entre em contato com a atmosfera, o que pode provocar sua oxidação. O controle de escoamento pela válvula é importante para que o nível de líquido no molde se mantenha constante durante todo o processo de lingotamento contínuo.

A figura apresenta um desenho esquemático contendo o distribuidor, a válvula submersa e o molde retangular.

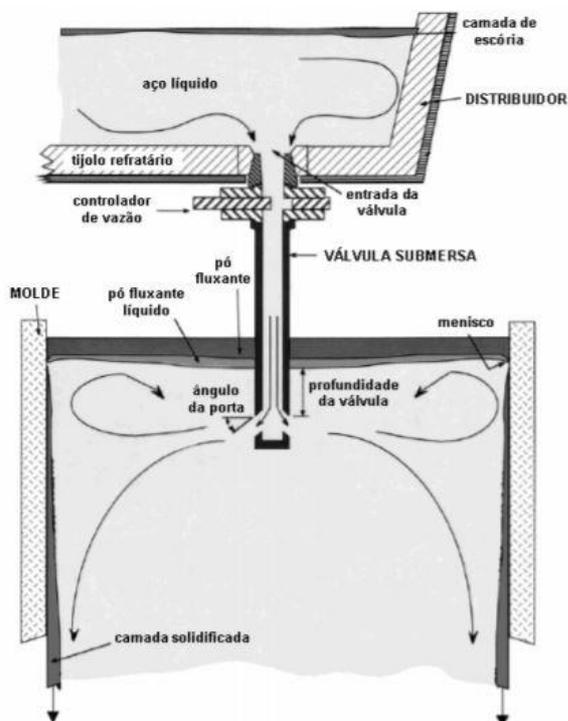


Figura 9 – Desenho esquemático do distribuidor, válvula submersa e molde (Thomas, 2003)

Além desses sistemas, outros dispositivos fazem parte de uma máquina de lingotamento contínuo. São eles: Câmara de spray para resfriamento, unidade de extração e desempeno, rolos extratores, máquinas de corte e rebarbador.

### 3.1.2 ÁRVORE LÓGICA

Para tornar possível a realização da análise preditiva em cada setor crítico da máquina de lingotamento contínuo, foi estabelecida uma árvore de acordo com o funcionamento da máquina.

A máquina pode ser dividida em diferentes etapas do processo de solidificação, cada divisão corresponde a um sub-sistema com equipamentos críticos para a manutenção do processo.

Cada uma dessas zonas contam com monitoramento indicando o funcionamento adequado de seus equipamentos.

Equipamento
Armazenador de Barra Falsa
Controle Automático de Nível
Unidade de Extração e Desempeno (UED)
Instrumentação
Leito de Resfriamento
Oxicorte
Mesa de Rolos
Sistema de Oscilação
Transferidor de Materiais 001 (TM001)
Transferidor de Materiais 002 (TM002)
Transferidor de Materiais 003 (TM003)

Tabela 1 – Tabela dos principais equipamentos monitorados

Essa árvore foi criada para direcionar as causas de paradas não esperadas de manutenção com todas as informações pertinentes das mesmas.

Cada falha causada por um desses equipamentos listados pela tabela 1 gera parada de máquina, afetando sua disponibilidade.

Essa árvore serviu de base para o armazenamento de informações no sistema PIMS.

### 3.1.3 SENSORES

A máquina conta com diversos sensores posicionados de acordo com as necessidades da cadeia produtiva. Além dos sensores para controle de produção, também se encontram sensores de vibração, termografia de acordo com a necessidade da equipe de manutenção.

Esses sensores tem função de detectar e responder a algum estímulo para fins de medição e monitoramento, indicando os parâmetros que determinarão a falha e consequentemente parada de máquina.

A metodologia de monitoração utilizada foi a contínua.

Dentre os principais sensores, pode-se citar;

**Sensores de temperatura:** Um sensor de temperatura é um dispositivo eletrônico que realiza medição da temperatura do seu entorno e converte essa informação em dados eletrônicos para gravar ou monitorar as mudanças de temperatura. Existem diversos tipos de sensores de temperatura, alguns dependem de contato físico direto para a realização da medição enquanto outros são capazes de realizar essa medição de maneira indireta.

Os sensores mais comumente usados são os termopares, sensor de temperatura por resistência, termistores, interruptores bimetálicos e sensores de temperatura por infravermelho.

Os termopares consistem de um par de fios de metal com propriedades diferentes unidos em uma extremidade. O par de metal gera uma diferença de tensão termoelétrica entre suas extremidades refletindo assim a diferença de temperatura existente entre elas. Uma padronização de temperatura no termopar é feita calibrando o dispositivo com temperaturas conhecidas, colocando uma das junções de metal em um material de temperatura conhecida e a outra no objeto cuja temperatura precisa ser identificada. A tensão exibida é lida utilizando uma fórmula de calibração e a temperatura do objeto pode ser calculada.



Figura 10 – Sensores de temperatura do tipo termopar

O sensor de temperatura de resistência é um enrolamento de fio que exhibe mudanças na resistência com mudanças de temperatura. Assim, quanto mais quentes eles se tornam, maior o valor de sua resistência elétrica. A platina é o material mais comumente usado neste tipo de sensor de temperatura porque este material é quase linear em uma ampla faixa de temperaturas e é muito preciso tendo um tempo de resposta rápido. Esses sensores também podem ser feitos de cobre ou níquel, com uma observação de que esses materiais possuem faixas restritas e problemas com a oxidação. Seus elementos são geralmente fios longos, semelhantes a molas, cercados por um isolador e colocados em uma bainha de

metal.



Figura 11 – Sensores de temperatura do tipo de resistência

Os termistores são extremamente sensíveis mas em contrapartida possuem uma faixa de temperatura limitada. Um termistor é um dispositivo semicondutor com uma resistência elétrica proporcional à temperatura. Existem dois tipos de termistores: com coeficiente de temperatura negativo, onde a resistência cai de forma não linear com o aumento da temperatura; e o de coeficiente de temperatura positivo, onde a resistência aumenta à medida que a temperatura aumenta.

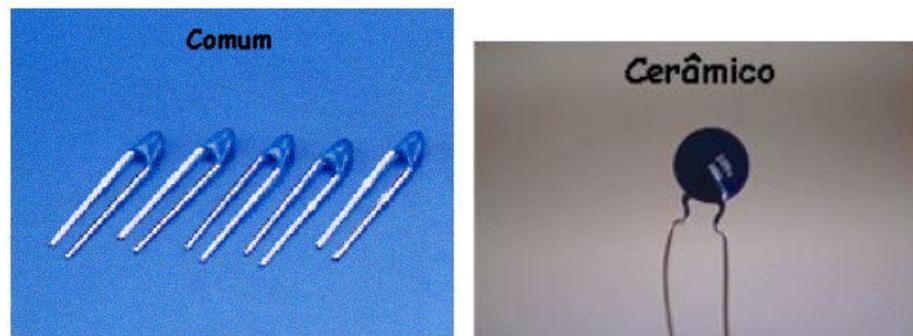


Figura 12 – Sensores de temperatura do tipo termistor

Os interruptores bimetalicos utilizam uma mola bimetalica como elemento principal do sensor de temperatura. Esta mola helicoidal é feita de dois tipos diferentes de metais que são presos juntos. Estes tipos de metais podem incluir cobre, aço ou latão, desde que um tenha baixa sensibilidade ao calor, enquanto o outro metal tenha alta sensibilidade ao calor. Assim, sempre que a parte soldada for aquecida, os dois metais sofrerão mudança de comprimento com base em suas taxas individuais de expansão térmica. Uma vez que os dois metais se expandem com comprimentos diferentes, a tira bimetalica é forçada a dobrar ou ondular para o lado com um coeficiente de expansão térmico. O movimento

da tira é usado para desviar um ponteiro sobre uma escala calibrada, que então indica a temperatura para o usuário.



Figura 13 – Sensores de temperatura do tipo interruptor bimetálico

O sensor de temperatura infravermelho sem contato absorve radiação infravermelha emitida por uma superfície aquecida. Ele é utilizado em uma variedade de aplicações onde a medição direta de temperatura não é possível. Com o sensor de temperatura infravermelho sem contato, a luz recebida é convertida em um sinal elétrico que corresponde a uma determinada temperatura.



Figura 14 – Sensores capacitivos de deslocamento sem contato

**Sensores de vibração:** Os principais sensores utilizados na medição de vibração são acelerômetros, sensores eletromagnéticos e capacitivos e os sensores eletrodinâmicos de velocidade.

Os sensores de deslocamento sem contato normalmente são montados com um pequeno espaço entre o sensor e a superfície do objeto em vibração. Como suas saídas são medições de deslocamento, elas são perfeitas para medições de vibração relativa. Essas

medições são feitas quando a localização física da superfície do objeto em vibração a qualquer momento é um fator crítico.

Como os sensores não estão montados no objeto, eles não alteram a massa do objeto ou suas características ressonantes. Esses sensores têm uma resposta de frequência plana de CC para quase sua resposta de frequência nominal. Como a saída não é afetada pela frequência da vibração, as medições são mais precisas em todo o espectro de frequências.

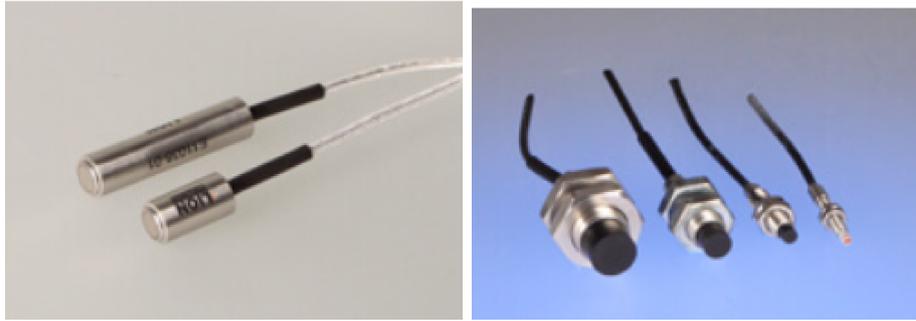


Figura 15 – Sensores capacitivos de deslocamento sem contato

Outro tipo de sensor de vibração é o acelerômetro, são pequenos dispositivos que são instalados diretamente na superfície do objeto em vibração. Eles contêm uma pequena massa que é suspensa por peças flexíveis que operam como molas. Quando o acelerômetro é movido, a pequena massa se desviará proporcionalmente à taxa de aceleração. Uma variedade de técnicas de detecção pode ser usada para medir a quantidade de deflexão da massa. Como as forças de massa e mola são conhecidas, a quantidade de deflexão é prontamente convertida em um valor de aceleração. Atualmente é o sensor mais utilizado para medição de vibração. Existem diversos tipos de acelerômetros, sendo que o mais utilizado é constituído por um ou mais cristais piezoelétricos.

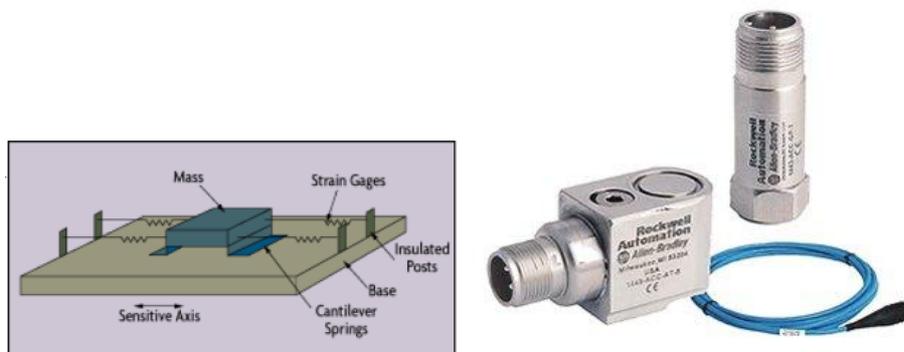


Figura 16 – Acelerômetros para medição de vibração

**Sensores de vazão volumétrica:** O sensor de vazão volumétrica é usado para medir a taxa de vazão, linear ou não linear, do volume de um líquido ou um gás.

Dentre os medidores de vazão conhecidos, estão: os rotâmetros, medidores de vazão eletromagnético, medidores de vazão ultrassônicos, medidores de vazão mássica coriólis, sensores de rotor, medidores de vórtice, entre outros.

A estrutura do rotâmetro é constituída por um tubo cônico transparente, onde estão inscritas graduações. Este tipo de medidor funciona com base no princípio de flutuação, ou seja, o fluido irá escoar por este medidor onde há um flutuador mais pesado que o material. Deste modo, o seu posicionamento dentro da estrutura será determinado pelo valor da vazão. Logo, quanto mais alta a medida, maior a vazão. Pode ser utilizado na medição de líquidos, gases e ar.



Figura 17 – Medidores de vazão do tipo rotâmetro

Este equipamento é conhecido também como medidor por tensão induzida ou magnético. O seu funcionamento está atrelado a lei de Faraday. Esta regra da indução eletromagnética é uma das equações fundamentais para o estudo do eletromagnetismo. Através dela entendemos a interação entre campos magnéticos e circuitos elétricos na geração de força eletromotriz.



Figura 18 – Medidores de vazão do tipo eletromagnético

Nestes medidores de vazão há dois princípios que podem ser utilizados: tempo de trânsito ou efeito doppler. Este último conceito é de especial importância para os sistemas de radar e sonar. O seu uso industrial tem como princípio a emissão de um raio ultrassônico em um líquido, resultando em espelhamento de parte da energia. Será este registro, com desvio na frequência, a ser mensurado pelo sensor.

Já na correlação cruzada, ou vazão por tempo de trânsito, medimos o intervalo de tempo entre emissão e recepção de sinais.



Figura 19 – Medidores de vazão do tipo ultrassônico

O princípio por trás desta tecnologia é a mecânica de movimento. Um sistema onde o fluido tem de passar por um tubo vibrante. Serão as variações ocorridas na estrutura interna que permitirão determinar a vazão mássica.

O que isto implica é que cada vez que um líquido ou gás passar pelos tubos a força de Coriolis será gerada. Assim como a força centrífuga, falamos aqui de um efeito não inercial. Consequentemente, a aceleração introduz a força de inércia, sendo proporcional à massa do fluido que está escoando. Os formatos comuns são a lira, o trombone e o “U”, ainda que existam outros.



Figura 20 – Medidores de vazão do tipo coriólis

Os sensores de rotor, transmissores e sistemas são um dos medidores de vazão mais populares. Dentre os modelos disponíveis, vários contêm encaixes de vazão ou inserções. Estes medidores requerem um mínimo de 10 diâmetros de tubo reto na entrada e 5 na saída. As saídas em onda senoidal e em pulso de onda quadrada são comuns, mas os transmissores estão disponíveis para montagem integral ou painel. O rotor do sensor da roda de pás é perpendicular à vazão e entra em contato com apenas uma seção limitada e transversal do fluxo.

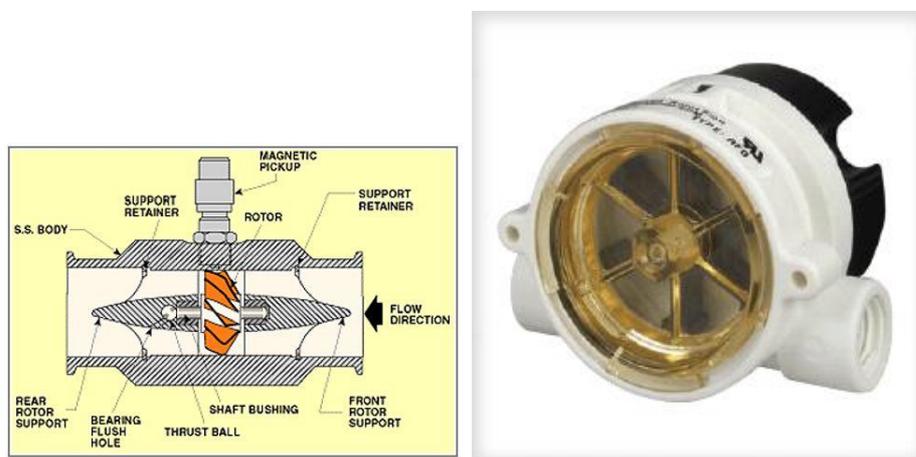


Figura 21 – Sensores de rotor

**Sensores de pressão:** Sensores de Pressão são componentes que traduzem uma força de pressão exercida por um gás ou líquido em sua superfície, em um dado de saída que se torna uma informação relevante para a indústria.

O sensor de pressão normalmente consiste em um corpo principal estável e um diafragma. O diafragma é o elemento mais importante para a medição de pressão e

é equipado com estruturas de resistência sensitiva à tensão e à compressão, também conhecidas como extensômetros ou strain-gauges (DMS).

O diafragma deforma-se sob a influência de pressão. Assim, os extensômetros conectados a ele são estendidos ou comprimidos e sua resistência varia de acordo com o movimento. Esta alteração de resistência é diretamente proporcional à pressão. Por exemplo, se os resistores estão conectados a uma ponte de Wheatstone, o resultado do sinal elétrico pode ser medido e transferido a um indicador.

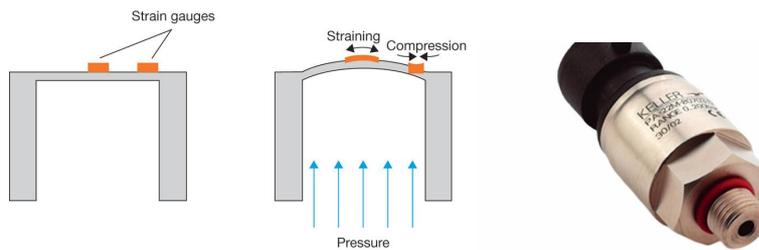


Figura 22 – Sensores de pressão

#### 3.1.4 COLETA DE DADOS

A coleta e monitoramento de dados é feita por intermédio de um controlador lógico programável, CLP, que capta os dados dos sensores e transmite esses dados para o sistema supervisor que armazena esses dados. Após isso, o supervisor irá alimentar o PIMS com as informações do processo.

O CLP é um computador especializado que desempenha funções de automação, controle e monitoramento de máquinas e de processos indústrias. A associação brasileira de normas técnicas (ABNT) define o CLP como "Um equipamento eletrônico digital com hardware e software compatíveis com as aplicações industriais".

O CLP surgiu no final da década de 1960, seu desenvolvimento tinha interesse na aplicação de computadores para a substituição de painéis de sequenciamento a relés para o controle de linhas de montagem de veículos.



Figura 23 – CLP Siemens Simatic S7-300 <https://new.siemens.com>

As principais características dos CLPs atualmente são, linguagem de programação de alto nível, simplificação nos quadros e painéis elétricos e confiabilidade operacional.

Tipicamente, um CLP possui alguns componentes ou unidades básicas integradas em um hardware.

**Unidade de processamento (CPU)** - Realiza a interpretação dos sinais externos e executa as rotinas de controle interno e o programa definido pelo usuário

**Fonte de energia** - Realiza a alimentação do controlador por meio de uma corrente elétrica. Também armazena uma bateria para evitar a perda do programa do usuário em caso de falta de energia.

**Memória EPROM** - Contém um programa elabora pelo fabricante que faz o start-up do controlador, armazena dados e gerencia a sequência de operações.

**Memória do Usuário** - É responsável por armazenar o programa aplicativo do usuário.

**Memória de Dados** - Nela se encontra dados referentes ao processamento do programa do usuário.

**Módulos de Entrada e Saída** - Possuem os circuitos de sinais externos, de forma a interligar o CLP aos sensores e atuadores.

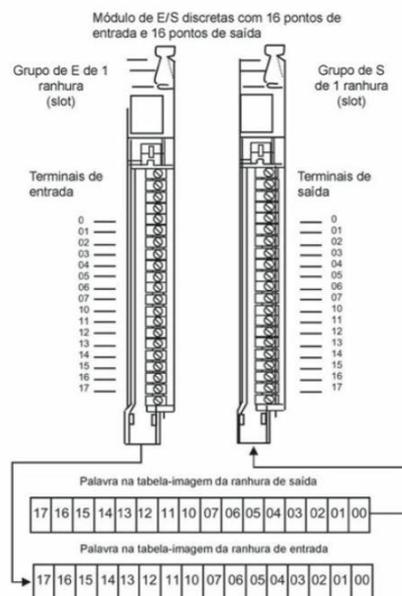


Figura 24 – Detalhes físicos típicos das barras de terminais de entrada e de saída Engenharia de Automação Industrial - MORAES, Cícero couto de

## Ciclo de Execução

O CLP funciona de maneira contínua em um processo chamado varredura. Em cada ciclo de varredura, o CLP realiza as seguintes atividades

- Leitura das entradas;
- Execução das instruções do programa;
- Escrita (atualização) das saídas.



Figura 25 – Ciclo de processamento - MORAES, Cícero couto de

### **Terminais remotos de entrada e saída**

Dado o alto número de dispositivos periféricos, é em muitos casos inviável ligar todos na interfase de entrada e saída do CLP. Para sanar isso faz-se uso dos terminais remotos, ou unidades remotas.

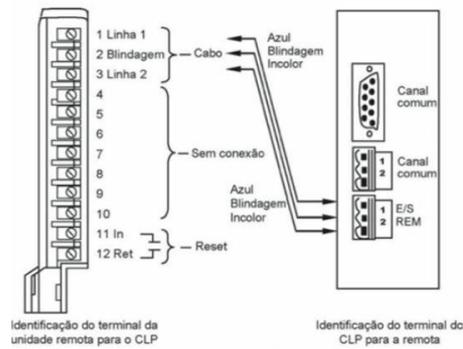


Figura 26 – Conectores dos terminais de E/S na unidade remota e no CLP - MORAES, Cícero couito de

### 3.1.5 SISTEMA DE SUPERVISÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Sistemas de supervisão e aquisição de dados, SCADA, são sistemas que utilizam software para automatizar a monitoração e o controle de processos industriais, efetuando a troca de informação entre uma estação central, e uma ou mais unidades remotas. As informações coletadas são apresentados para o operador através de interfaces homem-máquina.

Dentro das funcionalidades dos sistemas SCADA, encontram-se:

- Configuração da interface de comunicação, das variáveis de entrada e saída e dos operadores que terão acesso ao sistema;
- Construção de esquemas que representam graficamente o processo industrial.
- Geração de gráficos de tendências, que acompanham a evolução das variáveis do sistema;
- Geração de alarmes, que avisam ao usuário do sistema quando uma variável ou condição do processo de produção está fora dos valores previsto;

A interação entre os operadores e a estação central, é efetuada através de uma interface homem-máquina. Esta interface permite aos operadores monitorar o estado de um processo, e suspender manualmente as operações de controle automático em casos de emergência.

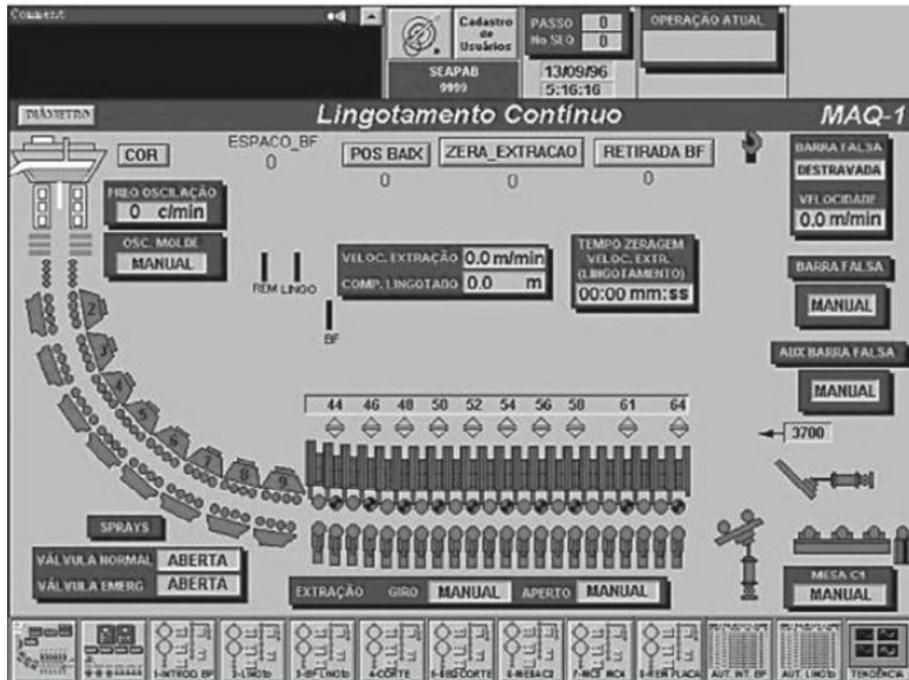


Figura 27 – Tela de supervisorío lingotamento contínuo - MORAES, Cícero couto de

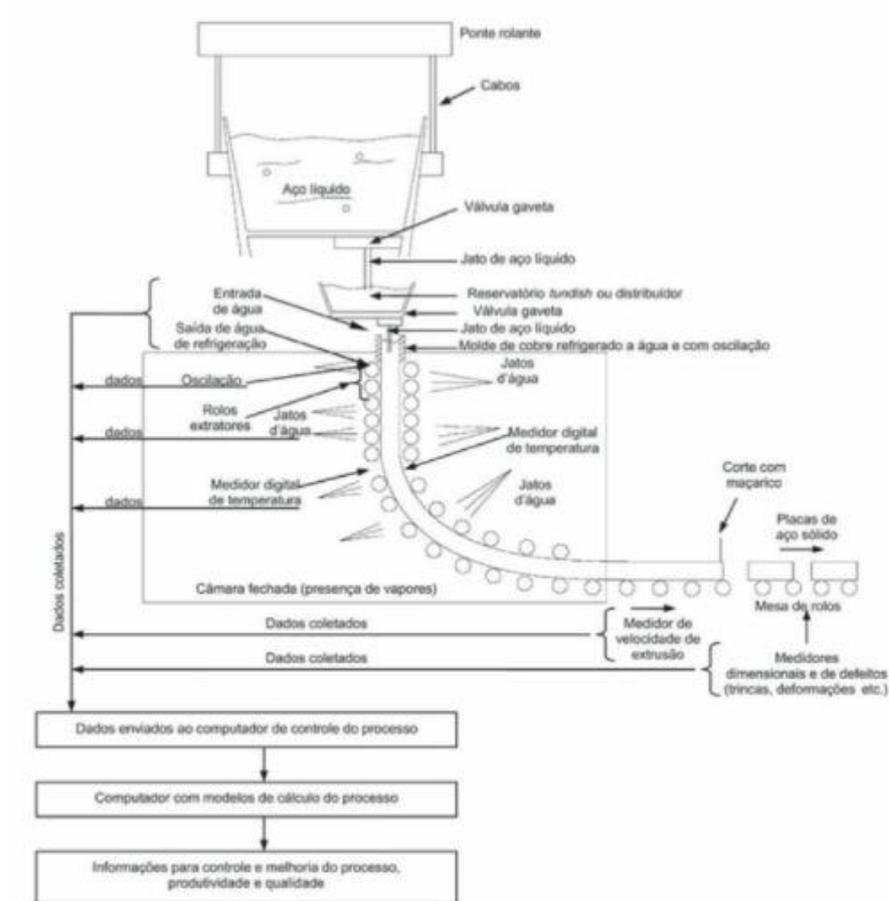


Figura 28 – Lingotamento contínuo do ponto de vista das informações - MORAES, Cícero couto de

A estação central é a unidade principal do sistema SCADA sendo equivalente a unidade mestre numa arquitetura mestre-escravo e responsável principalmente por coletar, armazenar e processar as informações geradas pelas estações remotas, para depois serem colocadas à disposição dos diversos clientes ou operadores, que possam requerê-las através da IHM e dessa forma agir em conformidade com os eventos detectados. Essa estação central pode estar em um único computador, ou distribuída em uma rede de computadores ou clientes, de modo a permitir a partilha de informações proveniente do servidor SCADA.

As conexões entre a estação central e outros sistemas podem ser feitas através de links de comunicação dedicados ou redes de área local.

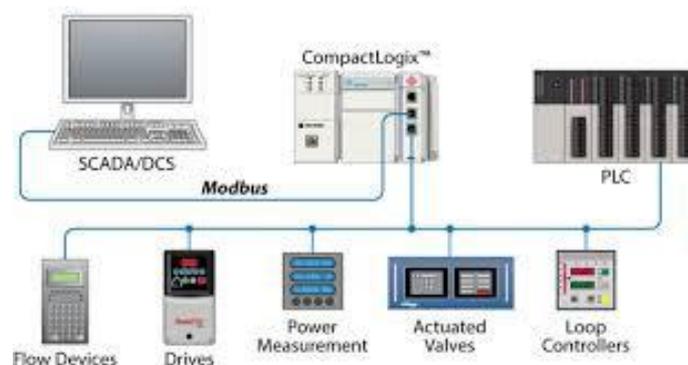


Figura 29 – Conexões do sistema SCADA

### 3.1.6 PIMS

PIMS ou Process information management systems, são sistemas que adquirem dados de processo de diversas fontes, os armazenam num banco de dados históricos e os disponibilizam através de diversas formas de representação.

Um sistema de automação industrial pode ser classificado em diferentes níveis hierárquicos. Esse níveis necessitam comunicar entre si com o objetivo de trocar informações.

O primeiro nível é o de controle e supervisão. Nesse nível estão presentes os equipamentos que interagem diretamente com o processo, com a instrumentação, CLP e SCADA. O segundo é representado pelas ferramentas de gerenciamento da produção, MES (Manufacturing Execution System) e PIMS.

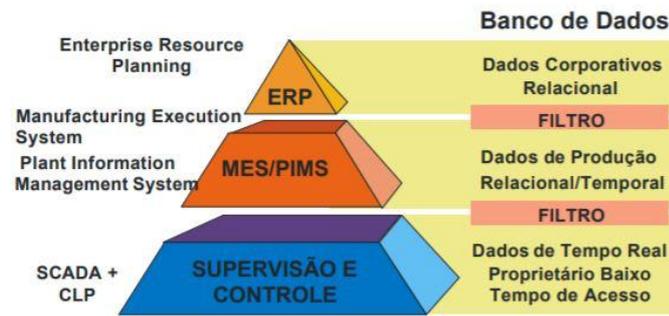


Figura 30 – Tela de supervisório lingotamento contínuo

O principal papel de um sistema PIMS é concentrar os dados de diferentes fontes, transformá-los em informação. No presente trabalho ele irá servir para armazenar as informações provenientes do sistema SCADA. Serão armazenados dados relacionados as paradas dos componentes.

Uma vez que o PLC estiver entregando os dados ao supervisório, será realizada a comunicação do supervisório com o sistema PIMS da usina para armazenamento de dados de paradas.

### 3.1.7 ANÁLISE PREDITIVA

Essa análise foi feita por meio da distribuição Weibull. Foram utilizados os dados de falha armazenados no sistema PIMS.

Os dados de falha foram coletados automaticamente, sendo armazenados no sistema PIMS da empresa. O acompanhamento para consideração de falha foi feito por meio da monitoração contínua com sistemas eletrônicos instalados na máquina, e o apoio do operador da máquina.

A responsabilidade do operador foi de validar e justificar as paradas e falhas indicadas pelo CLP, por meio de um sistema SDCA.

A análise preditiva foi feita com a distribuição Weibull. Utilizou-se o software Minitab 19 para definir os parâmetros de forma e escala e plotar os gráficos de função densidade de probabilidade, função de sobrevivência e função de taxa de falha, para a máquina e cada componente.

Os gráficos foram plotados para a máquina e cada componente definido em sua árvore lógica.

## 4 RESULTADO

### 4.1 RESULTADOS ALCANÇADOS

Foi possível identificar falhas e paradas com a metodologia utilizada. É possível elencar algumas falhas identificadas pelo SCADA e entregue ao supervisor os parâmetros avaliados.

Uma parada ocorreu decorrente da falha no sistema de instrumentação de água no molde. Nesse instante foi indicado início de parada pelo SCADA, posteriormente enviado ao PIMS. Pelo PIMS foi possível obter gráfico da vazão de água no molde, onde verifica-se que num determinado momento deixou de indicar a vazão de água, conforme gráfico abaixo.



Figura 31 – Gráfico vazão de água no molde

Outra parada de máquina registrada foi a quebra do acoplamento do movimento horizontal do leito. Essa quebra forçou o motor a funcionar em vazio, sem realizar nenhum trabalho como é possível verificar no gráfico obtido pelo PIMS.



Figura 32 – Gráfico de corrente do motor

Desse modo foi possível criar um banco de dados com o histórico de falhas no

Forma $\beta$	Escala $\eta$
1,24127	7396,13

Tabela 5 – Parâmetros  $\beta$  e  $\eta$  da distribuição - Elaborado pelo próprio autor

PIMS. Esse banco foi padronizado para conter a hora e data da falha, componente que falhou, duração da parada, causa e descrição da parada fornecida pelo operador. Com os dados obtidos foi possível obter os dados abaixo:

A disponibilidade da máquina foi de:

Disponibilidade
96,39 %

Tabela 2 – Porcentagem de disponibilidade da máquina - Elaborado pelo próprio autor

O MTBF, tempo médio entre falhas, encontrado foi de:

MTBF
107,63 Horas

Tabela 3 – MTBF da máquina - Elaborado pelo próprio autor

Por meio dos dados da duração de cada parada também foi possível definir o MTTR, tempo médio de reparo.

MTTR
39,49 minutos

Tabela 4 – MTTR da máquina - Elaborado pelo próprio autor

De posse dos dados foi possível definir a função de densidade de probabilidade, utilizando o software Minitab 19.

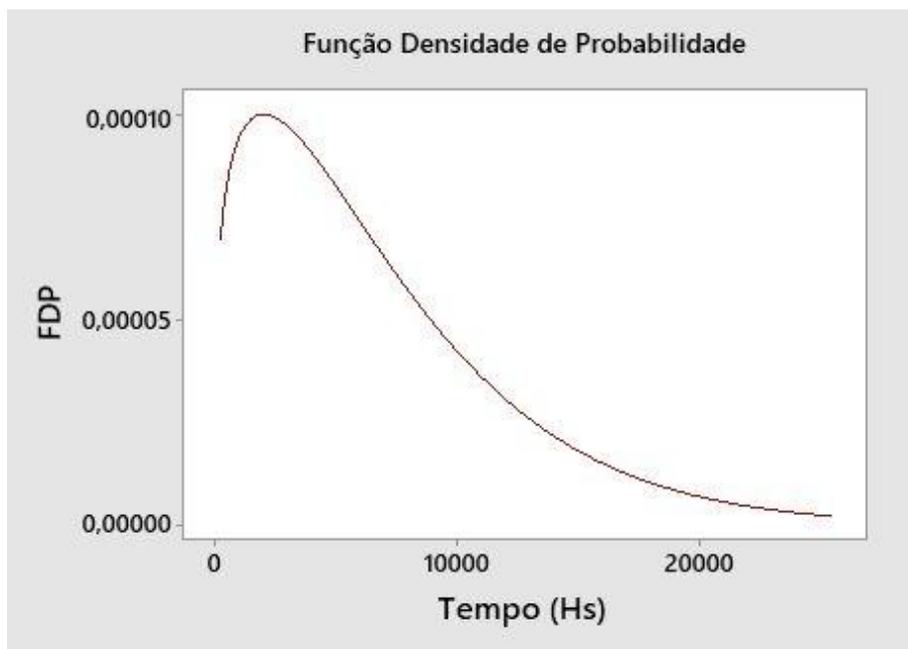


Figura 33 – Função de densidade de probabilidade

Com o mesmo software foram definidas a função de taxa de falha e de sobrevivência.

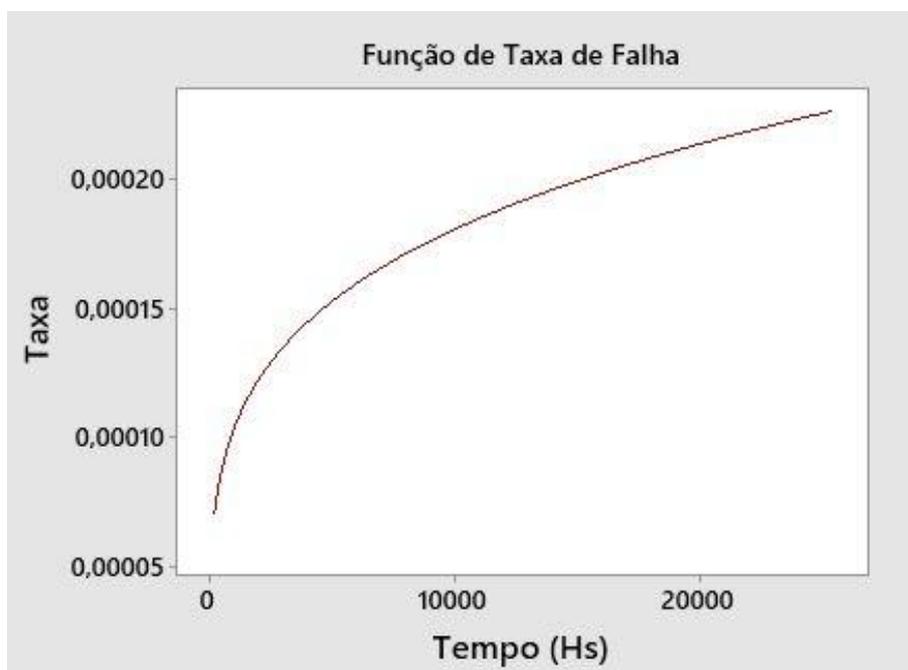


Figura 34 – Função de taxa de falha

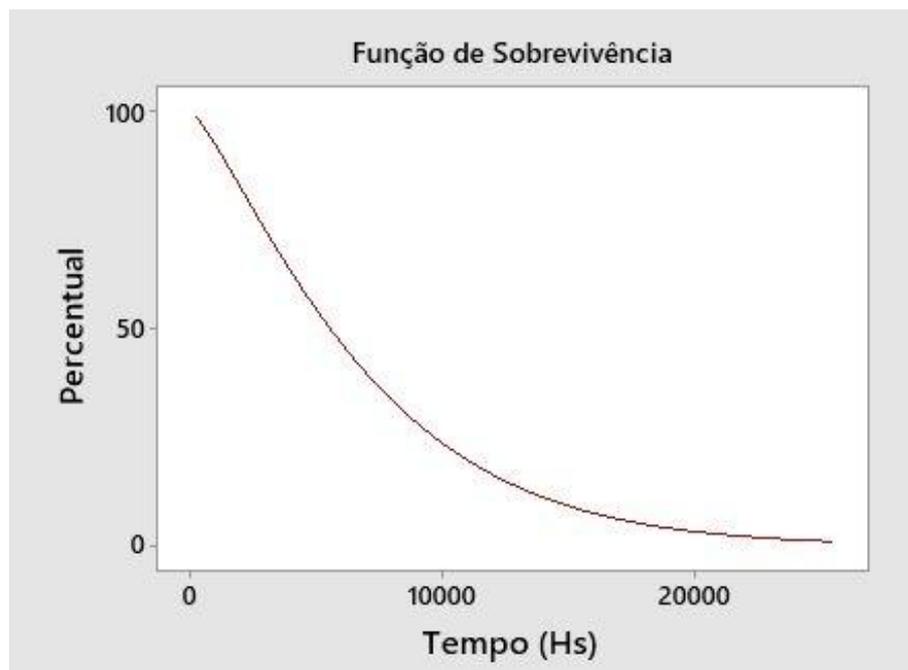


Figura 35 – Função de sobrevivência

#### 4.1.1 DISCUSSÃO ACERCA DOS RESULTADOS ENCONTRADOS

Com os dados obtidos no decorrer do projeto foi possível calcular os parâmetros da distribuição Weibull para cada componente e também da máquina. Após, foi possível executar o cálculo de densidade de probabilidade e produzir o gráfico correspondente.

Além da densidade foi possível gerar também outros gráficos que ajudaram a examinar melhor o conjunto de dados. Os gráficos utilizados foram a função de sobrevivência e a função da taxa de falha.

O gráfico da função de sobrevivência mostra a chance de sobrevivência da máquina desde o momento em que ela é posta em serviço até um tempo específico. A função da taxa de falha indica a quantidade de falhas da máquina esperadas durante um período de tempo.

Pelo gráfico de sobrevivência, pode-se ver que a máquina possui confiabilidade superior a 90% até a vida estimada em 1000 horas. O valor de confiabilidade de 90% é o mínimo esperado para a máquina. De forma a garantir que esse mínimo seja alcançado, pode-se fazer uso das paradas preventivas programadas no período indicado pela curva de sobrevivência.

Seguindo o parâmetro pode-se ajustar as intervenções realizadas na máquina, priorizando os componentes de acordo com a função de sobrevivência de cada equipamento. Isso é possível para a equipe de manutenção ao se utilizar o devido planejamento para tal façanha. A função de sobrevivência não só dita os melhores tempos de intervenções, tendo

como garantia a confiabilidade indicada, como também possibilita a redução de gastos com mão de obra especializada em manutenção na máquina, bem como trocas desnecessárias que seriam realizadas.

## 5 CONCLUSÃO

A aquisição dos dados, que agora estão disponíveis no PIMS, possibilitou a realização de uma análise de confiabilidade para os principais componentes da máquina de lingotamento contínuo. Além da análise de confiabilidade o banco permite amplo acesso as variáveis de funcionamento da máquina, permitindo que colaboradores de outras áreas e fora das cabines contendo o sistema SCADA, possam monitorar o desempenho da máquina de lingotamento contínuo.

A distribuição Weibull permitiu descrever o tempo de vida dos principais componentes, bem como direcionar os tempos de intervenção nos componentes.

Com os dados é possível traçar boas práticas de manutenção com margem de segurança entregue pela análise de confiabilidade. Nesse sentido, a utilização de monitoramento contínuo da máquina permite que os funcionários de manutenção possam se organizar de maneira mais eficiente e intervir nas máquinas quando de fato for necessário, garantido segurança, item obrigatório em siderurgia, e redução de custos.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMAN - *Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos*. Acesso em Fonte: 10 outubro 2020 <http://www.abraman.org.br/>
- Fogliatto, F. S., José Luis Duarte Ribeiro. (2011). *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO.
- Kardec, A., Júlio Nascif. (2009). *Manutenção Função Estratégica*. Rio de Janeiro: Qualitymark.
- Moubray, J. (1997). *Reliability Centered Maintenance*
- Otani, M., Machado, W. V. (2008). *A Proposta de Desenvolvimento de Gestão da Manutenção Industrial na Busca da Excelência ou Classe Mundial*. Revista Gestão Industrial, 01-16.
- CASTRUCCI, Plínio de Lauro MORAES, Cícero Couto. *Engenharia de Automação Industrial*. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- TROJAN et al. *Classificação dos tipos de Manutenção pelo Método de Análise Multicritério Electre TRI*. VLX SBPO, p. 343-357, 2013.
- WILLIAMS, 1994 apud CASTELLA, 2001. *Como é a Manutenção para a Athena*. 2001. Disponível em: <<http://athena-automacao.com.br/home.html>>. Acesso em 20/10/2020.
- BARBOSA, F. A. *Modelamento matemático e físico do escoamento do aço líquido em diferentes projetos de distribuidor do processo de lingotamento contínuo da USIMINAS*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2002. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- NAKAJIMA, S. *Introdução ao TPM*. São Paulo: IMC Internacional Sistemas Educativos, 1989. 110p.

## ANEXO A – DADOS DE CONFIABILIDADE DOS COMPONENTES

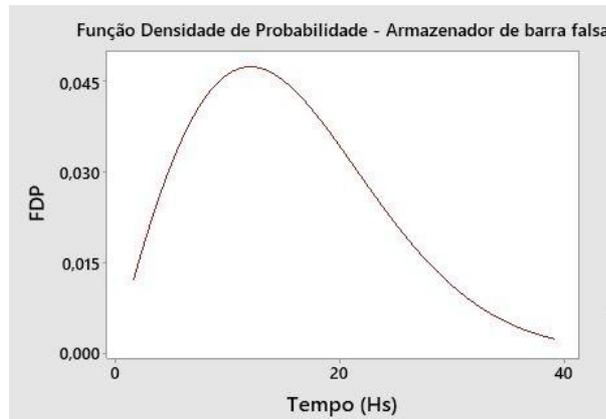


Figura 36 – Função densidade de probabilidade do Acumulador de barra falsa, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

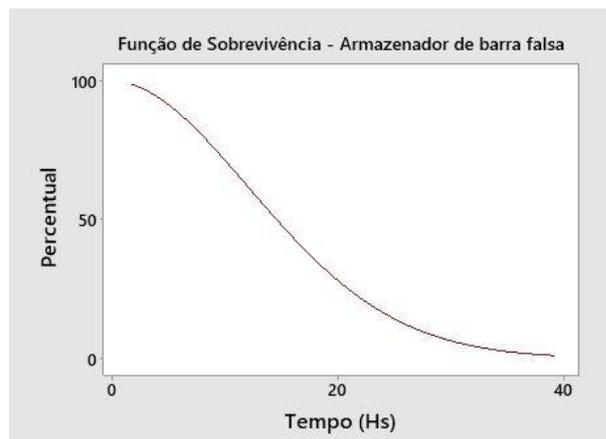


Figura 37 – Função de sobrevivência do Acumulador de barra falsa, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

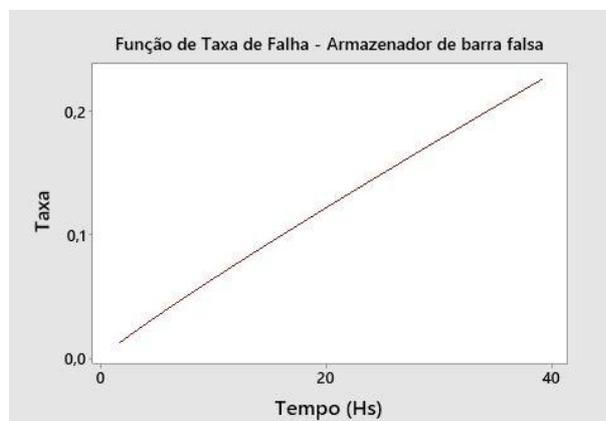


Figura 38 – Função de taxa de falha do Acumulador de barra falsa, Resultado da análise pelo Minitab

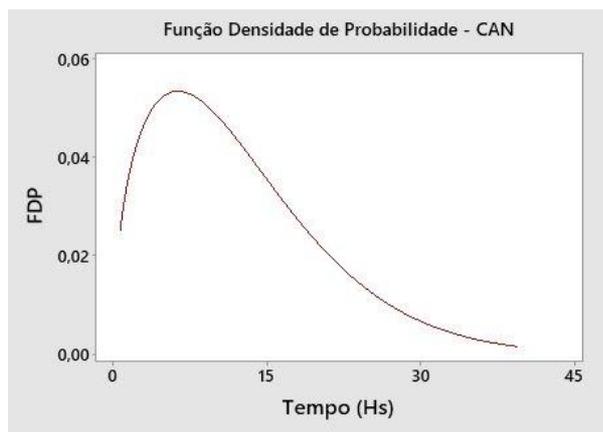


Figura 39 – Função densidade de probabilidade do CAN, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

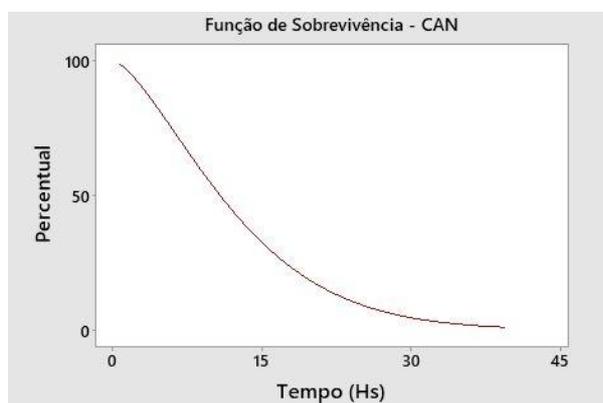


Figura 40 – Função de sobrevivência do CAN, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

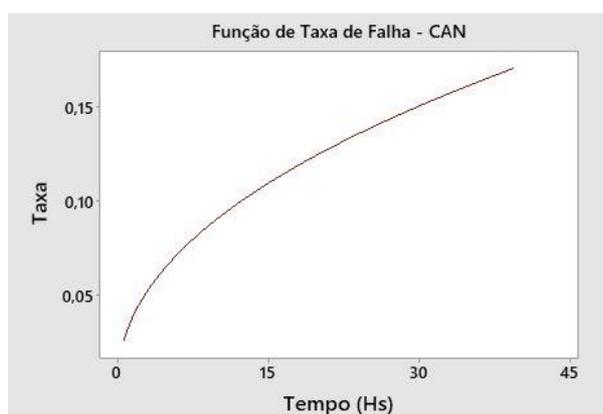


Figura 41 – Função de taxa de falha do CAN, Resultado da análise pelo Minitab

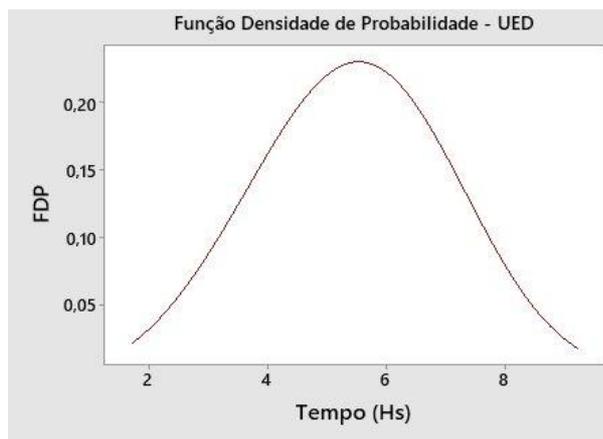


Figura 42 – Função densidade de probabilidade da UED, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

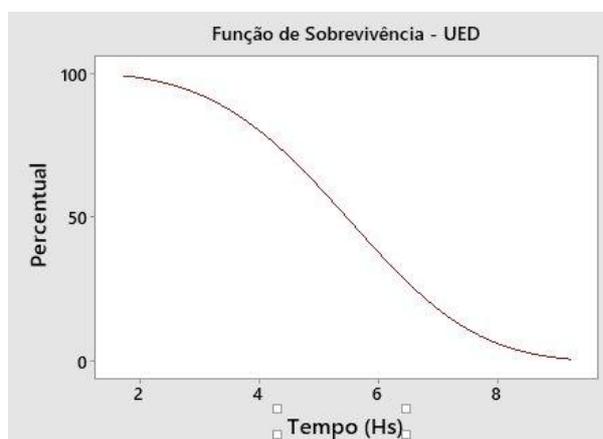


Figura 43 – Função de sobrevivência da UED, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

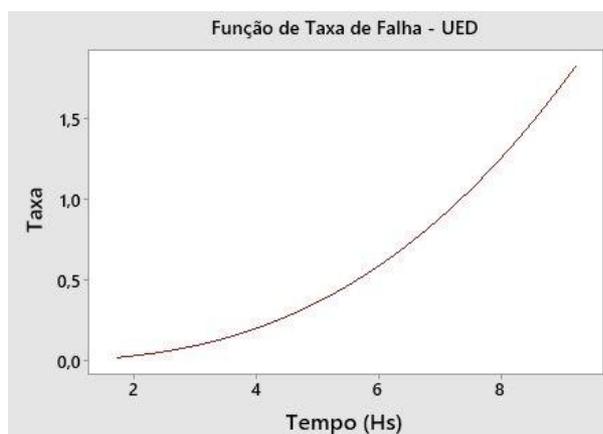


Figura 44 – Função de taxa de falha da UED, Resultado da análise pelo Minitab

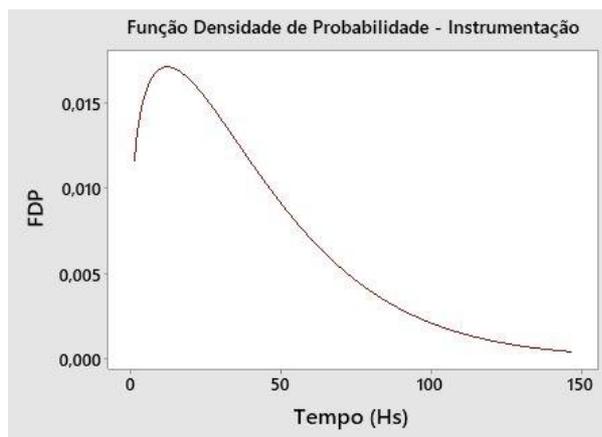


Figura 45 – Função densidade de probabilidade do sistema de instrumentação, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

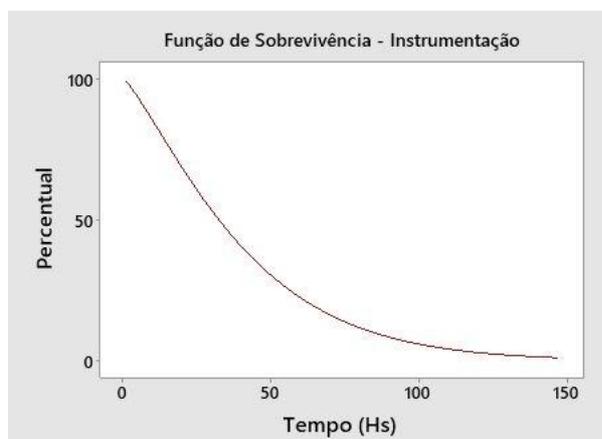


Figura 46 – Função de sobrevivência do sistema de instrumentação, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

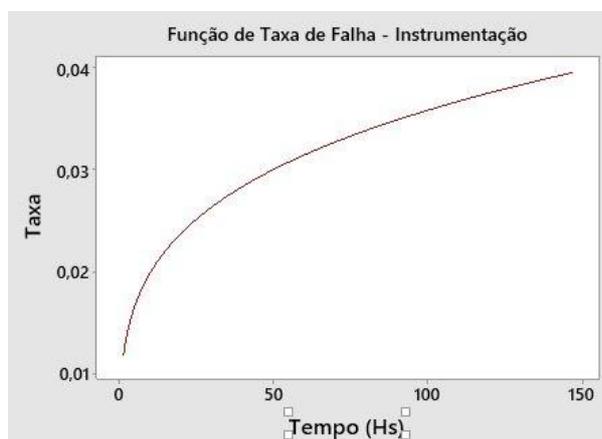


Figura 47 – Função de taxa de falha do sistema de instrumentação, Resultado da análise pelo Minitab

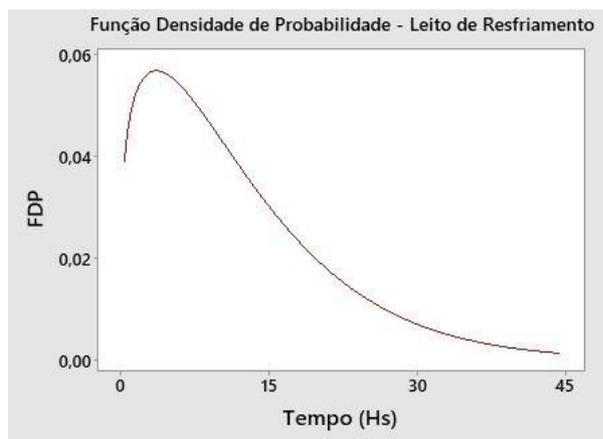


Figura 48 – Função densidade de probabilidade do Leito de resfriamento, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

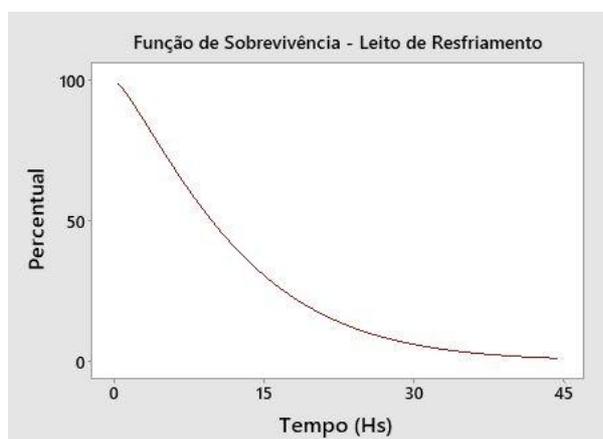


Figura 49 – Função de sobrevivência do Leito de resfriamento, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

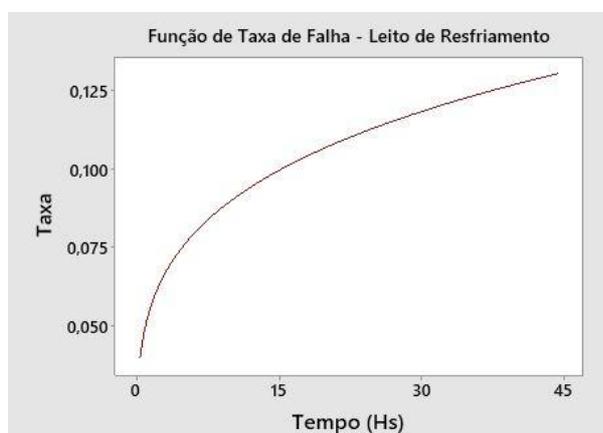


Figura 50 – Função de taxa de falha do Leito de resfriamento, análise pelo Minitab



Figura 51 – Função densidade de probabilidade do conjunto de oxicorte, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

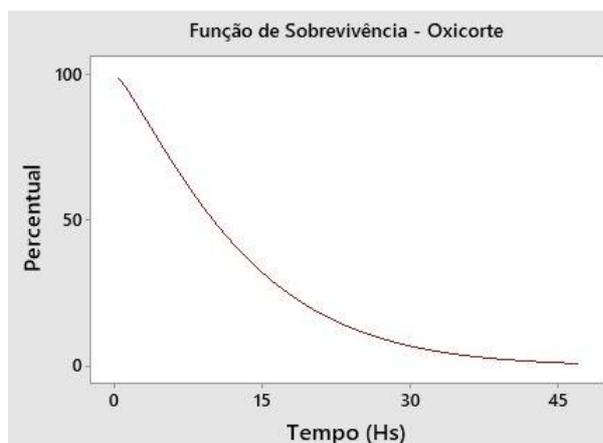


Figura 52 – Função de sobrevivência do conjunto de oxicorte, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

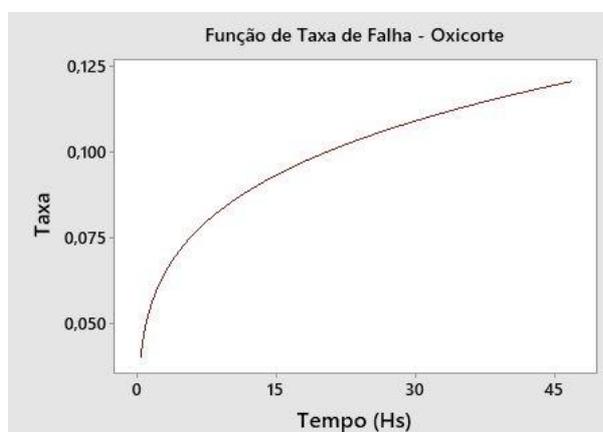


Figura 53 – Função de taxa de falha do conjunto de oxicorte, Resultado da análise pelo Minitab

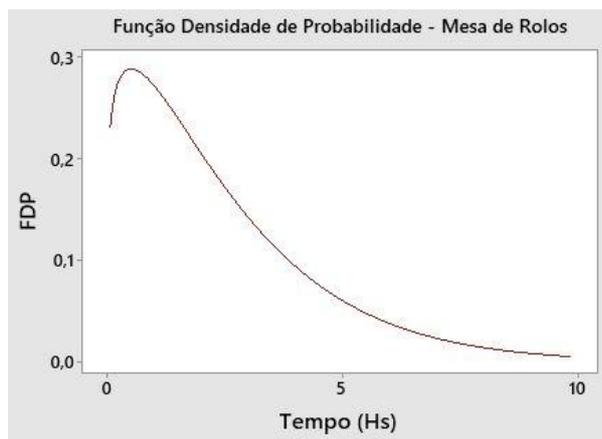


Figura 54 – Função densidade de probabilidade da mesa de rolos, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

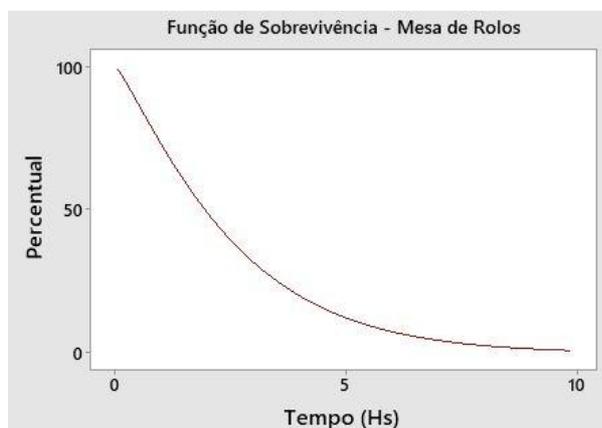


Figura 55 – Função de sobrevivência da mesa de rolos, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

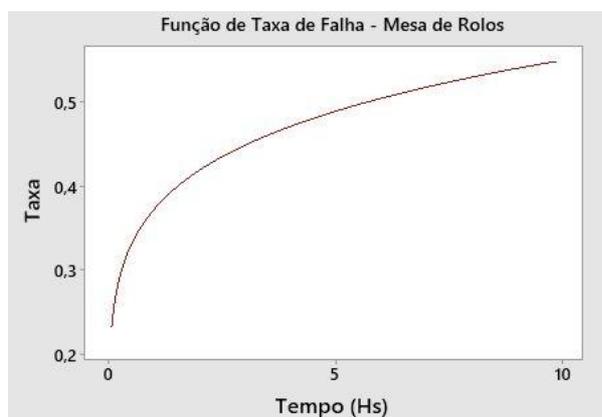


Figura 56 – Função de taxa de falha da mesa de rolos, Resultado da análise pelo Minitab

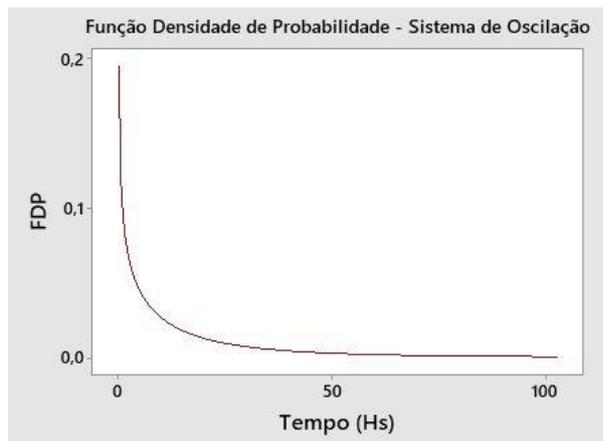


Figura 57 – Função densidade de probabilidade do sistema de oscilação, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

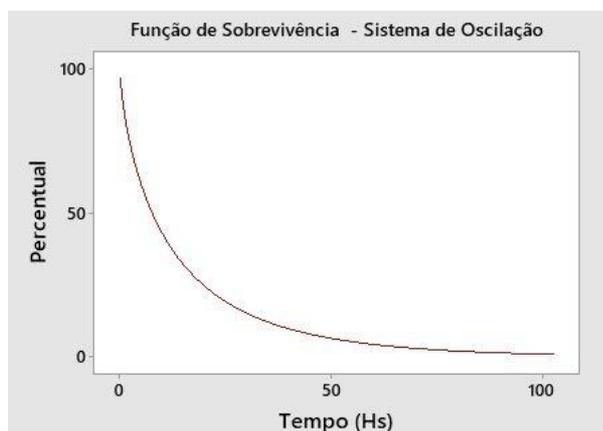


Figura 58 – Função de sobrevivência do sistema de oscilação, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

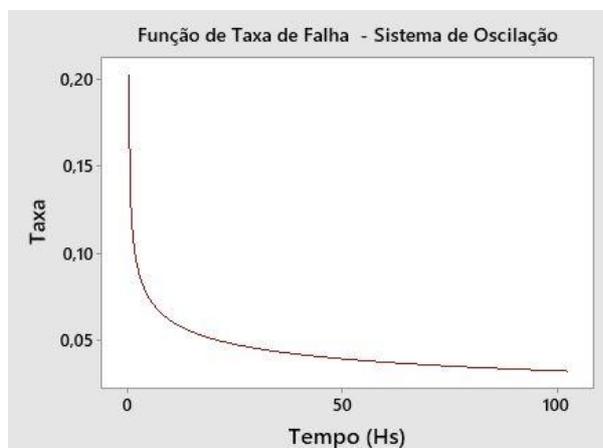


Figura 59 – Função de taxa de falha do sistema de oscilação, Resultado da análise pelo Minitab

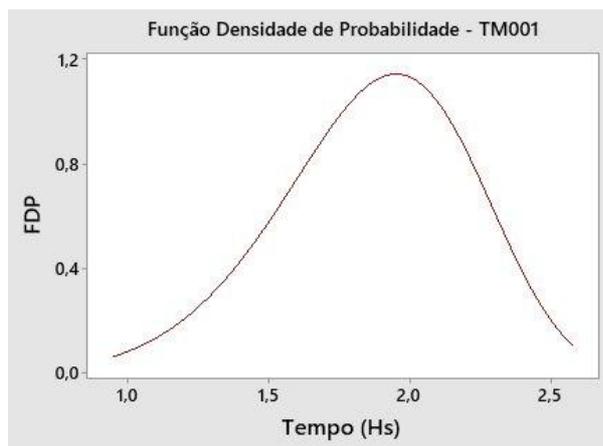


Figura 60 – Função densidade de probabilidade do TM001, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

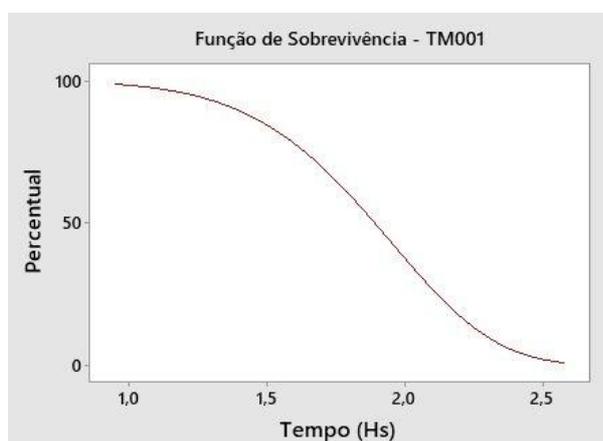


Figura 61 – Função de sobrevivência do TM001, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

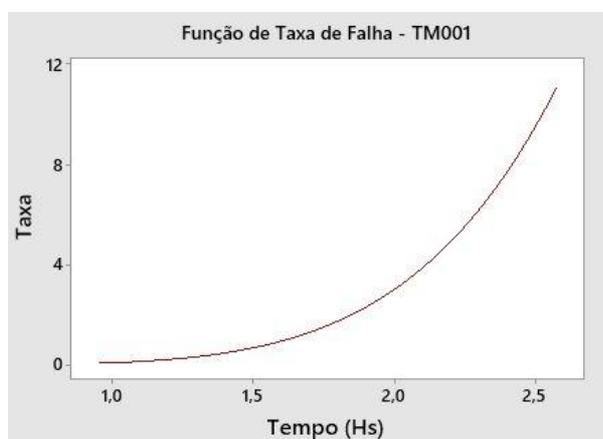


Figura 62 – Função de taxa de falha do TM001, Resultado da análise pelo Minitab

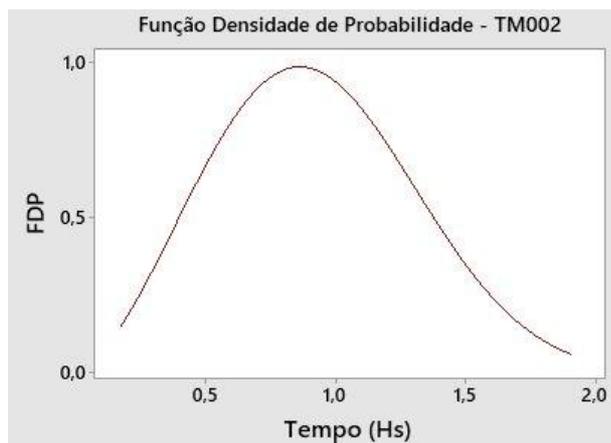


Figura 63 – Função densidade de probabilidade do TM002, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

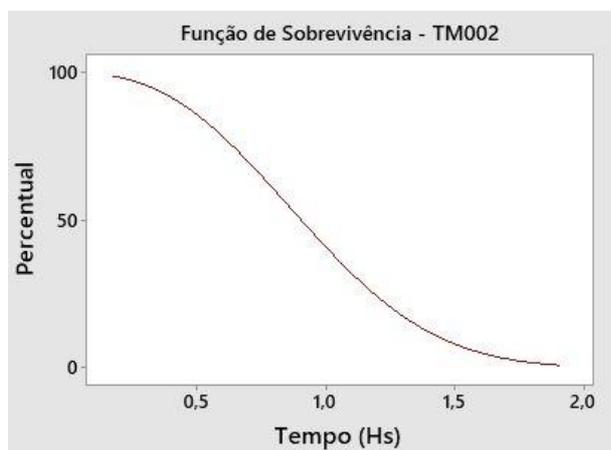


Figura 64 – Função de sobrevivência do TM002, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

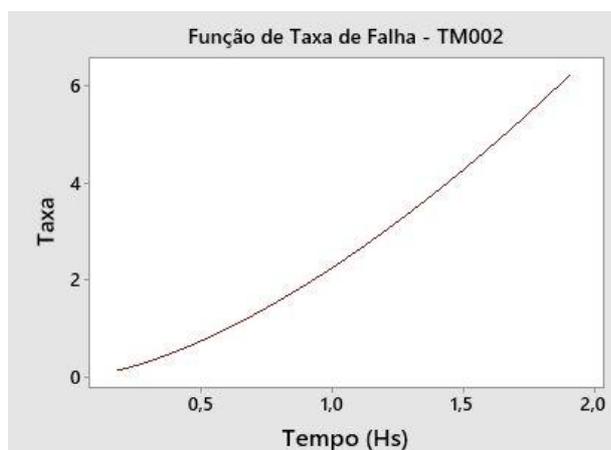


Figura 65 – Função de taxa de falha do TM002, Resultado da análise pelo Minitab

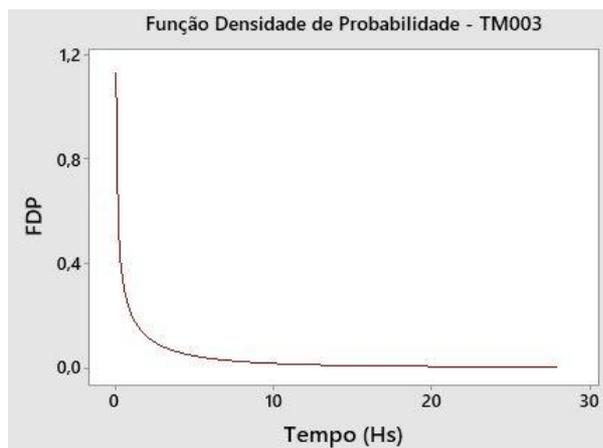


Figura 66 – Função densidade de probabilidade do TM003, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

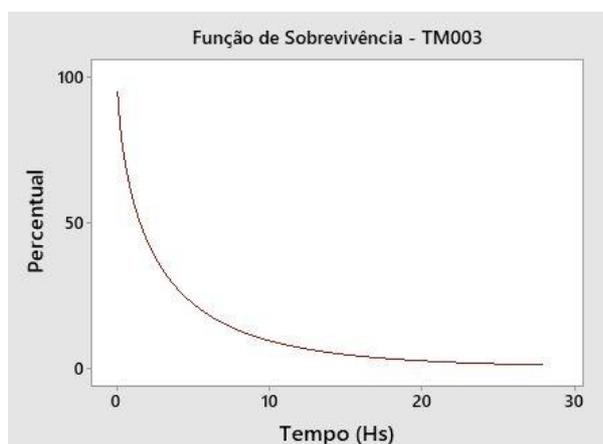


Figura 67 – Função de sobrevivência do TM003, Fonte: Resultado da análise pelo Minitab

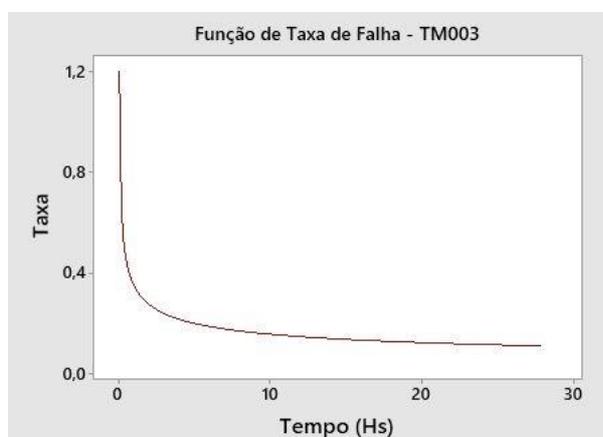


Figura 68 – Função de taxa de falha do TM003, Resultado da análise pelo Minitab