

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Automotiva

Estimativa da vida útil de um componente industrial e a concepção de um plano de manutenção fundamentado em parâmetros de confiabilidade

Autor: Rafael Kayque dos Santos
Orientador: Prof. Dr. Eng. Henrique Gomes de Moura

Brasília, DF



Rafael Kayque dos Santos

**Estimativa da vida útil de um componente industrial e a
concepção de um plano de manutenção fundamentado
em parâmetros de confiabilidade**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Automotiva) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Automotiva).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Eng. Henrique Gomes de Moura

Brasília, DF

Rafael Kayque dos Santos

Estimativa da vida útil de um componente industrial e a concepção de um plano de manutenção fundamentado em parâmetros de confiabilidade/ Rafael Kayque dos Santos. – Brasília, DF, -

104 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Henrique Gomes de Moura

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , .

1. . 2. . I. Prof. Dr. Eng. Henrique Gomes de Moura . II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estimativa da vida útil de um componente industrial e a concepção de um plano de manutenção fundamentado em parâmetros de confiabilidade

CDU 02:141:005.6

Rafael Kayque dos Santos

Estimativa da vida útil de um componente industrial e a concepção de um plano de manutenção fundamentado em parâmetros de confiabilidade

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Automotiva) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Automotiva).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 11 de dezembro de 2020:

**Prof. Dr. Eng. Henrique Gomes de
Moura**
Orientador

**Profa. Dra. Eng. Viviane Vasconcellos
Ferreira Grubisic**
Convidado 1

**Prof. Dr. Eng. Fábio Cordeiro de
Lisboa**
Convidado 2

Brasília, DF

Este trabalho é dedicado à todos os que acreditam que os sonhos se tornam realidade através do esforço e da perseverança.

*“pois é Deus quem produz em vós
tanto o querer como o realizar,
de acordo com sua boa vontade.
(Bíblia Sagrada, Filipenses 2:13)*

Resumo

Por ocorrência da alta competitividade existente entre as empresas, aquelas que gozam de informações que permitam realizar tomadas de decisões na direção de assegurar o cumprimento de requisitos funcionais dos ativos físicos da corporação com um baixo risco de falha associado, permitindo, concomitantemente, reduzir os custos operacionais da companhia além de conter os desperdícios dos processos de manufatura e de manutenção, encontram-se em posição de privilégio em detrimento da sua concorrência. Esse quadro pode oportunizar o pioneirismo econômico da empresa no setor em que se aplica. Visando fomentar tal cenário, o estudo da confiabilidade é explorado. O presente trabalho apresenta, mediante um levantamento bibliográfico das principais referências do ramo, as contribuições do estudo da confiabilidade no que tange as estratégias empregadas na análise de contenção de falhas, no controle da qualidade de manufatura e na gestão da manutenção de componentes e sistemas industriais. Nesse sentido, os fundamentos matemáticos da probabilidade e da estatística são explorados em vista de apresentar as principais medidas de confiabilidade admitidas num cenário corporativo, bem como de anunciar as técnicas mais empregadas para a sua estimativa. Por meio de um estudo de caso, as principais medidas de confiabilidade associadas à operação de um componente industrial são estimadas, utilizando-se da distribuição de probabilidade de *Weibull* com dois parâmetros. A implementação do método da máxima verossimilhança é realizada a partir de um modelo de randomização de dados de falha, tendo em vista ilustrar o procedimento matemático-computacional empregado por este trabalho na estimativa dos parâmetros da função densidade de probabilidade empreendida. O centro do trabalho traduz-se no mapeamento da vida útil de um componente industrial, objetivando estabelecer um plano de manutenção fundamentado em parâmetros de confiabilidade para este.

Palavras-chaves: confiabilidade; análise de falhas; estimação de parâmetros; manutenção de ativos;

Abstract

Due to the high competitiveness that exists between companies, those that enjoy the information that allows decision making to be carried out to ensure compliance with the functional requirements of assets with a low risk of associated failure, allowing, at the same time, to reduce the company's operating costs factory and contain the waste from manufacturing and maintenance processes, are in a privileged position to the detriment of their competition. This situation can provide opportunities for the company's economic pioneering in the sector in which it is applied. To foster this scenario, the study of reliability is explored. The present work presents, by means of a bibliographic survey of the main references of the branch, the contributions of the reliability study regarding the strategies used in the analysis of failure containment, quality control, and maintenance management of components and industrial systems. In this sense, the mathematical foundations of probability and statistics are explored in order to present the main reliability measures admitted in a corporate scenario, as well as announce the most used techniques for their estimation. Through a case study, the main reliability measures associated with the operation of an industrial component are estimated, using the probability distribution of Weibull with two parameters. The maximum likelihood method is implemented based on a failure data randomization procedure, aiming to estimate the parameters of the probability density function undertaken. The center of the work is the mapping of the useful life of an industrial component, aiming to establish a Maintenance plan centered on reliability parameters for it.

Key-words: reliability; failure analysis; parameter estimation; asset maintenance;

Lista de ilustrações

Figura 1 – Desmembramento dos modos de falha para duas válvulas no fluxo de suprimento. Fonte: (SMITH, 2017)	22
Figura 2 – Estrutura básica do Diagrama de Ishikawa 6M. Fonte: Elaborado pelo próprio autor.	24
Figura 3 – Relação entre performance e tempo de operação do equipamento. Fonte: (DUTRA, 2019)	26
Figura 4 – Curva de Falha Potencial e as estratégias de manutenção. Fonte: (DUTRA, 2019)	30
Figura 5 – Diagrama de decisão referente ao tipo de atividade de manutenção recomendada. Fonte: Adaptado de (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009)	35
Figura 6 – Curva de Falha Potencial versus curva de custo para reparo. Fonte: (DUTRA, 2019)	40
Figura 7 – Curva de interação entre a Função de distribuição acumulada e Função de confiabilidade. Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)	42
Figura 8 – Partição do Espaço Amostral para $n = 5$. Fonte: (PINHEIRO et al., 2013)	44
Figura 9 – Exemplo de Função densidade de probabilidade, considerando uma distribuição normal. Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)	47
Figura 10 – Exemplo de função de distribuição acumulada, considerando uma distribuição normal. Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)	48
Figura 11 – Exemplo de função de confiabilidade, considerando uma distribuição normal. Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)	49
Figura 12 – Curva da banheira. Fonte: (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009)	51
Figura 13 – Efeito da variação do parâmetro de forma para distribuições de <i>Weibull</i> , considerando $\theta = 100$ e $\delta = 0$. Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)	54
Figura 14 – Efeito da variação do parâmetro de escala para distribuições de <i>Weibull</i> . Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)	54
Figura 15 – Efeito da variação do parâmetro de localização para a distribuição de <i>Weibull</i> . Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)	55
Figura 16 – Função de risco da distribuição de <i>Weibull</i> Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)	56
Figura 17 – Distribuição de Gauss. Fonte: (MONTGOMERY, 2018)	58
Figura 18 – Etapas do DMAIC implementadas como método de abordagem. Fonte: Elaborado pelo autor	68

Figura 19 – Fragmento do algoritmo computacional dedicado à solução da equação da máxima verossimilhança para <i>Weibull</i> . Fonte: Ambiente computacional implementado pelo autor	72
Figura 20 – Fragmento do algoritmo computacional dedicado à realização das iterações para o cálculo da raiz da equação da máxima verossimilhança para <i>Weibull</i> . Fonte: Ambiente computacional implementado pelo autor	73
Figura 21 – Fragmento do algoritmo computacional dedicado à randomização de dados de tempo até a falha (TTF). Fonte: Ambiente computacional implementado pelo autor	74
Figura 22 – Máquina CMB5000 <i>Bodymaker</i> . Fonte: <i>CarnaudMetalbox Engineering website</i>	76
Figura 23 – Principais componentes da CMB5000 <i>Bodymaker</i> . Fonte: (IPS, 2018) .	77
Figura 24 – Exemplo de um retentor de vedação hidráulico. Fonte: (ASIA,)	78
Figura 25 – Exemplo de instalação do retentor de vedação hidráulico junto ao conjunto <i>Domer</i> da <i>Bodymaker</i> . Fonte: Fotografia tirada por mecânico de campo.	78
Figura 26 – Diagrama de Causa e Efeito de falha do retentor hidráulico. Fonte: Elaborado pelo autor	82
Figura 27 – Série de riscos para o funcionamento da máquina <i>Bodymaker</i> . Fonte: Elaborado pelo autor	84
Figura 28 – Valores característicos de β e θ (de <i>Weibull</i>) para componentes industriais. Fonte: (BLOCH; GEITNER, 1997)	86
Figura 29 – Valores característicos de β e θ para componentes industriais, continuação. Fonte: (BLOCH; GEITNER, 1997)	88
Figura 30 – Resultado da estimativa das medidas de confiabilidade, considerando uma confiança de 95% para o resultado. Fonte: Elaborado pelo autor .	90
Figura 31 – Início da zona de desgaste de um componente em função da sua idade ou tempo de operação. Fonte: Modificado de Moubray (1996)	92
Figura 32 – Demonstração gráfica da vida útil do retentor de vedação e da sua zona de desgaste. Fonte: Modificado de Moubray (1996)	93
Figura 33 – Resultado das principais medidas de confiabilidade para o retentor de vedação, considerando $t = 25.000$ ciclos de operação. Fonte: Ambiente computacional elaborado pelo autor	94
Figura 34 – Pilares a serem considerados para anúncio de uma falha potencial. Fonte: Elaborado pelo autor	96
Figura 35 – Diagrama para auxiliar na tomada de decisão quando a rotina de manutenção do retentor de vedação hidráulico. Fonte: Elaborado pelo autor	98

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação das probabilidades a priori e posteriori. Fonte: Adaptado de Pinheiro et al. (2013)	46
Tabela 2 – Desdobramento da Função Qualidade (QFD)	80
Tabela 3 – Randomização de dados de falha para o retentor de vedação hidráulico, considerando uma amostra de 40 dados. Fonte: Elaborado pelo autor.	86
Tabela 4 – Randomização de dados de falha para o retentor de vedação hidráulico, considerando uma amostra de 10 dados. Fonte: Elaborado pelo autor.	87
Tabela 5 – Comparação dos parâmetros de <i>Weibull</i> para o retentor de vedação hidráulico, considerando duas amostras de tamanhos diferentes de dados de falha: $n = 40$ e $n = 10$. Fonte: Elaborado pelo autor.	87
Tabela 6 – Frequências de inspeção e de substituição para o componente em ciclos de operação.	95

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACR	Análise de Causa Raíz
CEP	Controle estatístico de Processo
f.d.p	Função Densidade de Probabilidade
FTA	<i>Faul Tree Anlyasis</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
MPT	Manutenção Produtiva Total
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTF	<i>Mean Time to Fail</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
PCM	Planejamento e Controle da Manutenção
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PDP	Processo de desenvolvimento de produtos

Lista de símbolos

E	Experimento Aleatório
A	Evento
$P(A)$	Probabilidade do Evento
Ω	Espaço Amostral
$f(t)$	Função Densidade de Probabilidade
μ	Média da função
σ	Desvio padrão da Função
σ^2	Variância da Função
$F(t)$	Função de Distribuição Acumulada]
$R(t)$	Função de Confiabilidade
t	Variável Aleatória para tempo até falha
$h(t)$	Função de <i>Hazard</i>
λ	Taxa de falha da distribuição Exponencial
β	Parâmetro de forma da distribuição de <i>Weibull</i>
θ	Parâmetro de escala da distribuição de <i>Weibull</i>
δ	Parâmetro de localização da distribuição de <i>Weibull</i>
Γ	Função Gamma
$L(\theta)$	Função verossimilhança para um dado parâmetro θ

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização	15
1.2	Justificativa	17
1.3	Motivação	17
1.4	Objetivos	18
1.5	Metodologia	19
1.5.1	Limitações do trabalho	19
2	FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	20
2.1	Um paralelo entre Confiabilidade e Falha	20
2.1.1	Diagrama de Ishikawa	23
2.1.2	Série de Riscos	24
2.1.3	Tipos de Falha	25
2.1.4	Curva de Falha Potencial (PF)	26
2.2	Um paralelo entre Confiabilidade e Manutenibilidade	27
2.2.1	Manutenção Reativa	27
2.2.2	Manutenção Preventiva	28
2.2.3	Manutenção Preditiva	29
2.2.4	Manutenção Centrada em Confiabilidade	30
2.3	Um paralelo entre Confiabilidade e Qualidade	36
2.3.1	Desdobramento da Função Qualidade QFD	37
2.4	Um paralelo entre Confiabilidade e Custo	37
2.4.1	Análise de custos inseridos em atividades de confiabilidade no PDP	38
2.4.2	Análise de custos inseridos em atividades de confiabilidade no PCP	38
2.4.3	Análise de custos inseridos em atividades de confiabilidade no PCM	39
2.5	Um paralelo entre Confiabilidade, Probabilidade e Estatística	41
2.5.1	Axiomas da probabilidade	42
2.5.2	Probabilidade Condicional	43
2.5.3	Teorema da Probabilidade Total e Teorema de Bayes	43
2.5.4	O Teorema de Bayes e as principais medidas de confiabilidade	46
2.5.5	Função densidade de probabilidade	47
2.5.6	Função de distribuição acumulada	48
2.5.7	Função de confiabilidade	49
2.5.8	Função de <i>Hazard</i>	49
2.5.9	Curva da banheira	50

2.5.10	As principais distribuições de probabilidade para o domínio contínuo	52
2.5.11	Distribuição de <i>Weibull</i>	52
2.5.12	Distribuição exponencial	56
2.5.13	Distribuição normal ou Gaussiana	57
2.5.14	Estimativa de parâmetros	58
2.5.15	Estimativa da Máxima Verossimilhança	59
2.5.16	Estimativa da Máxima Verossimilhança para a distribuição exponencial	60
2.5.17	Estimativa da Máxima Verossimilhança para a distribuição de <i>Weibull</i>	61
3	METODOLOGIA	63
3.1	DMAIC	63
3.2	DMAIC - Definição	64
3.3	DMAIC - Medição	64
3.3.1	Randomização de dados de falha	65
3.4	DMAIC - Análise	66
3.5	DMAIC - Melhoria (<i>Improve</i>)	67
3.6	DMAIC - Controle	67
4	AMBIENTE COMPUTACIONAL	69
4.1	Concepção e principais fundamentos do ambiente computacional	69
4.2	Estruturação dos procedimentos matemáticos em ambiente com- putacional	70
4.2.1	Estimador da máxima verossimilhança	71
4.2.2	Teorema da Bisseccção e Teorema de Bolzano	73
4.2.3	Randomização de tempos até falha (TTF)	74
5	RESULTADOS	75
5.1	DMAIC - Definição	75
5.1.1	Estudo de caso: Análise de confiabilidade de um retentor hidráulico industrial	75
5.1.2	Um paralelo entre requisitos do cliente e requisitos de projeto	78
5.1.3	Análise de falha do componente	81
5.2	DMAIC - Medição	85
5.3	DMAIC - Análise	89
5.4	DMAIC - Melhoria (<i>Improve</i>)	91
5.4.1	Programação das atividades de inspeção e substituição do componente	93
5.5	DMAIC - Controle	96
6	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS	101

1 Introdução

Este capítulo apresenta os principais contextos que culminaram na exploração do estudo da confiabilidade, bem como elucida a importância da aplicação desse estudo em atividades inerentes ao Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP), Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) e Planejamento e Controle da Produção (PCP), realizando, ao mesmo tempo, um paralelo com os modelos de gestão *Lean Manufacturing* e *Seis Sigma*. Também são apresentados a justificativa, a motivação que deu origem ao presente trabalho, bem como os objetivos global e específicos desta obra.

1.1 Contextualização

Com o advento da globalização, a concorrência entre empresas tem apresentando um crescimento progressivo. [Fernandes \(2010\)](#) afirma que isso é oriundo de um cenário onde o nível de exigência por parte dos clientes relacionada a qualidade dos produtos tem sido cada vez maior. Tal demanda, por sua vez, traz consigo diversos desafios que as empresas acabam por enfrentar na busca de se manterem ativas num mercado cada vez mais competitivo ([SOUZA et al., 1999](#)).

Nesta perspectiva, o Brasil configura-se um mercado consumidor atrativo para as empresas multinacionais, devido principalmente ao fomento da política de industrialização do país, como exemplo o Programa Rota 2030 (Lei N^o 13.755 de 10 de dezembro de [2018](#)). Nesse mesmo sentido, os investimentos no Brasil próprio das companhias internacionais tornam-se cada vez mais recorrentes. [Fernandes \(2010\)](#) articula que em razão desse capital estrangeiro que entra no país, as empresas locais sentem-se coagidas a aprimorar, da mesma forma, o seu padrão de qualidade de maneira a competir com as empresas de fora. [Souza et al. \(1999\)](#) concordam ao afirmarem que organizações nacionais que não investem em melhoria na automação industrial, departamentos de pesquisa, tampouco em seu nível de RH, em virtude dessa disputa intercontinental por um espaço no mercado, não conseguem sobreviver.

Por efeito da necessidade que as empresas têm de melhorar a sua gestão da qualidade de produtos e serviços, aprimorando a performance de seus processos, muito se fala nos modelos de gestão *Lean Manufacturing* e *Seis Sigma*.

[George \(2003\)](#) elucida que a filosofia *Lean* ao ser implementada numa linha de produção, por exemplo, proporciona um alcance satisfatório dos níveis de disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade dos ativos, de acordo com as especificações e metas da empresa. Tal cenário é planejado para acontecer concomitantemente ao alcance do menor

índice de desperdício na produção, eliminando processos ou atividades que não agregam valor para o cliente, tendo em vista que a economia atual foca na diminuição de custo e tempo de produção, é o que afirmam [Alcaraz et al. \(2014\)](#).

A filosofia *Seis Sigma*, por sua vez, também proporciona um cenário de melhoria contínua nos níveis de qualidade por meio da redução da variabilidade nos processos, o que está diretamente relacionado com a diminuição dos índices de defeitos da produção. Assim sendo, planejar alcançar uma baixa taxa de falhas em produtos é de extrema importância, não visando somente a satisfação e fidelização do consumidor, mas também a sua segurança ([FOGLIATO; RIBEIRO, 2009](#)).

Ao se falar em produtos com baixa taxa de falhas, também popularmente intitulado como "produto de confiança", um termo muito adotado pelos grandes pesquisadores do ramo da engenharia de produto, desde a década de 1950, tem sido: confiabilidade. Em seu sentido mais amplo, "confiabilidade está associada à operação bem sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas" é o que afirmam [Fogliato e Ribeiro \(2009\)](#). Ainda, [Ahmed \(1996\)](#) expõe que, além de ser importante para a satisfação e segurança do consumidor, a confiabilidade de um produto ou serviço possibilita que o cliente permaneça fiel à marca. [Düpow e Blount \(1997\)](#) concordam com [Ahmed \(1996\)](#) ao alegarem que, "um produto não-confiável pode acarretar no fechamento da empresa, devido à perda de negócios causada pela má reputação destes produtos". [Braglia, Fantoni e Frosolini \(2006\)](#) concluem ao afirmar que, se a qualidade do produto atualmente é necessária para permanecer-se no negócio, num futuro próximo, a confiabilidade será considerada obrigatória para se fazer negócio.

Todavia, eis um complexo desafio no sentido de garantir um alto nível de confiabilidade para um determinado produto: superdimensionar componentes os deixam muito caros (o que pode causar danos aos cofres da empresa), ao passo que subdimensionar componentes os deixam vulneráveis á falharem catastroficamente, lesando o seu usuário. Nesse sentido, a economia atual foca no atingimento do equilíbrio entre duas partes: dar vida a produtos que garantam a segurança e o bem-estar do usuário, durante o tempo em que lance mãos de estratégias de produção que culmine na minimização de custos e tempo de produção, é o que expõem [Düpow e Blount \(1997\)](#). Na seção 2.4, será abordado um pouco mais a respeito da aliança entre custo e confiabilidade.

Conforme [Filho \(2006\)](#), a mensuração da confiabilidade compõe o conjunto dos Indicadores de Performance (em inglês, *Key Performance Indicator* (KPI)) largamente aplicados em processos industriais, sejam estes inerentes ao Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP), Planejamento e Controle da Produção (PCP) ou Planejamento e Controle da Manutenção (PCM). No contexto da manutenção, foi criada uma vertente da confiabilidade voltada para a gestão de ativos, a saber, a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC). [Moubray \(1996\)](#) define a MCC tal como um processo utilizado a

fim de designar o que é necessário ser feito para garantir que cada ativo físico progrida em realizar o que seus usuários querem que ele execute em seu cenário operacional. Na seção 2.2.4, a MCC será apresentada, salientando os seus principais fundamentos e pilares de implantação nas empresas.

Por fim, Dutra (2019) concorda com Moubray (1996) ao expor que um ativo confiável numa planta industrial possibilita atender especificações de produtividade e qualidade de uma empresa. Isto é, a confiabilidade possibilita aumentar a capacidade de um negócio obter lucro.

1.2 Justificativa

O tempo de vida útil de um produto de engenharia é um dos atributos mais importantes quando o assunto é confiabilidade. Quanto maior for a confiabilidade de um produto, maior será a probabilidade do mesmo de desempenhar eficientemente sua função por um longo período de tempo, tendo em vista as suas especificações de projeto. No entanto, realizar uma previsão de vida útil por via da análise de confiabilidade traz consigo alguns desafios (DODSON; SCHWAB, 2006).

Fogliato e Ribeiro (2009) elucidam que, em vista mensurar-se os níveis de confiabilidade de um item ao longo do tempo de sua operação, se faz imprescindível ter acesso a um banco de dados de falha. Tais dados podem ser obtidos por meio do planejamento de testes acelerados em bancada, por via de relatos de falhas em campo reportadas à central de atendimento ao cliente ou mesmo mediante a utilização de serviços de garantia do produto (FERNANDES, 2010) e (SOUZA et al., 1999).

No contexto da engenharia de manutenção, é indispensável adotar uma política de monitoramento e controle das informações de falha dos ativos da planta, responsabilidade esta imputada à equipe de PCM (Planejamento e Controle da Manutenção) da empresa. O sucesso dessa política depende do nível de maturidade da empresa em relação à gestão da manutenção. Dutra (2019) afirma que a manutenção deve ser vista como um campo de investimentos ao invés de um campo de prejuízos. Ainda o autor afirma que, um plano de gestão eficaz da manutenção visa sempre aumentar a disponibilidade e a confiabilidade de seus ativos, cenário no qual são realizadas cada vez menos intervenções de manutenção ao mesmo tempo em que são utilizados cada vez menos recursos para tal.

1.3 Motivação

Uma realidade bastante comum em toda fábrica, independente de seu seguimento ou nicho de mercado, é o fato de as máquinas presentes na linha de produção nem sempre operarem com o nível de confiabilidade desejado pelo usuário. Tal fato interfere grande-

mente nos resultados de qualidade da manufatura, nos custos de operação da empresa, no meio ambiente e principalmente na segurança do operário de máquina (DUTRA, 2019).

De igual modo, Dutra (2019) afirma que um ambiente industrial que disponha de um departamento de PCM (Planejamento e Controle da Manutenção) falho ou inexistente, se defronta mais comumente com baixos índices de disponibilidade de seus ativos, o que acaba por inviabilizar o atingimento de metas de produtividade. Moubray (1996) corrobora que esse tipo de cenário leva a empresa a arcar com altos custos de intervenção de manutenção de caráter reativo, o que representa uma estratégia dispendiosa da manutenção, se comparado com outros métodos preventivos (manutenção preditiva e preventiva) para a maioria dos processos.

De acordo com Dutra (2019), o lucro cessante também representa uma grande parcela do prejuízo que a empresa pode sofrer com a parada imprevista da linha de produção (tal tópico será explanado com maior detalhamento na seção 2.4). Diante disso, conhecer o tempo de vida útil dos componentes que compõem uma máquina é vital em vista de antecipar-se á sua falha funcional, e visando isso, os estudos de confiabilidade são explorados.

Por meio de um estudo de caso realizado em conjunto com uma fabricante de latas de alumínio no Brasil, uma análise de confiabilidade de um retentor de vedação hidráulico será apresentada na seção 5.1.1, objetivando, num primeiro momento, estimar a vida útil do componente em questão, para em seguida, estabelecer um plano de manutenção centrado em parâmetros de confiabilidade para este.

1.4 Objetivos

O objetivo global do presente trabalho consiste na elaboração de um plano de manutenção fundamentado em parâmetros de confiabilidade para um componente industrial, objeto de um estudo de caso.

Os objetivos específicos, por sua vez, podem ser apresentados como a seguir:

1. Aplicar soluções computacionais criadas capazes de analisar e processar dados de falha com foco na estimativa de vida útil por meio de uma análise de confiabilidade.
2. Elaborar um plano de manutenção fundamentado em parâmetros de confiabilidade para o componente analisado, utilizando-se dos resultados de confiabilidade obtidos da análise empreendida no objetivo anterior.

1.5 Metodologia

O método de pesquisa científica utilizada nesse trabalho de conclusão de curso é classificado como estudo de caso, de acordo com Miguel (2007). Segundo o autor, o estudo de caso equivale à uma abordagem de cunho qualitativo e é regularmente utilizado para a coleta de dados. Yin (2017) corrobora afirmando que o método do estudo de caso envolve três fases principais: (i) a escolha do referencial teórico e o desenvolvimento de procedimentos para a coleta de dados; (ii) o gerenciamento do estudo de caso, com a coleta e análise de dados; (iii) a análise dos dados obtidos mediante a teoria designada e a posterior interpretação dos resultados.

De forma procedural, o método de abordagem deste trabalho seguirá o percurso exibido por quatro etapas sucessivas, exibidas conforme a seguir:

1. Apresentação das principais contribuições do estudo de confiabilidade na implementação de análise de falha, planejamento da manutenção, controle de qualidade e análise de custos.
2. Exposição dos principais fundamentos de probabilidade e estatística inerentes a estimativa da confiabilidade de um item.
3. Identificação das principais características do sistema e do problema a serem estudados por meio de um estudo de caso.
4. Realização, por meio de visitas técnicas em campo, da medição de tempos para falha do componente objeto de estudo de caso, visando a aplicação destes dados em modelagens matemáticas para a estimação da confiabilidade associada ao item de análise.

1.5.1 Limitações do trabalho

Em virtude da política nacional de isolamento social e a impossibilidade de realizar visitas em chão de fábrica no período da pandemia ocasionada pelo novo Coronavírus (COVID-19), as informações de campo não puderam ser obtidas. Tal fato culminou na necessidade de adotar-se uma mudança de metodologia que a princípio foi planejada para ser implementada por via da aquisição presencial de dados de tempo até falha (TTF) de um componente analisado por meio de um estudo de caso. Portanto, a alternativa metodológica envolverá um procedimento de randomização de TTF's a partir de um banco de dados que dispõe de informações empíricas para diversos componentes operantes no contexto industrial, proposto por Bloch e Geitner (1997) e apresentado na seção 5.2.

2 Fundamentos da análise de Confiabilidade

Este capítulo propõe trazer uma análise multidisciplinar a respeito dos principais fundamentos do estudo da confiabilidade num ambiente corporativo. Por meio de uma revisão bibliográfica, num primeiro momento, será abordado um paralelo entre o estudo da confiabilidade e análise de falha (ver 2.1), onde algumas ferramentas bastante implementadas serão exemplificadas em meio a fusão destas duas áreas. Posteriormente, na seção 2.2 será feito um paralelo entre o estudo da confiabilidade e as estratégias de manutenção industrial. Nesta altura, será feita uma inserção dos fundamentos da confiabilidade no estudo de manutenção, dando origem a Manutenção Centrada em Confiabilidade.

O estudo da confiabilidade proposto por este trabalho também passará em meio a análise de qualidade. A correlação entre as duas vertentes será assunto na seção ???. De igual modo, a correlação entre a análise de custos num ambiente corporativo e o estudo de confiabilidade será feita com base em três níveis diferentes: (i) atividades de confiabilidade inseridas no PDP (Processo de Desenvolvimento de Produtos), (ii) atividades de confiabilidade no PCP (Planejamento e Controle da Produção) e (iii) atividades de confiabilidade no PCM (Planejamento e Controle da Manutenção). Por fim, na seção 2.5, a análise da confiabilidade será feita com base nos conceitos matemáticos do campo da probabilidade e estatística.

2.1 Um paralelo entre Confiabilidade e Falha

Para O'Connor e Kleyner (2012), notáveis pesquisadores da área, a confiabilidade é o estudo sobre as falhas que podem advir sobre um produto ao longo do seu ciclo de vida ou sobre um processo ao longo do seu trilha de funcionamento. O autor ainda defende que tal estudo envolve desde a fase de detecção de falhas e mensuração dos seus níveis, até o estágio de controle das mesmas.

Smith (2017) acrescenta que confiabilidade é a probabilidade de não surgirem falhas em um determinado período de tempo. Ainda Guimarães (2002) concorda com Smith (2017) ao sustentar que a prevenção das falhas tornou-se uma aplicação fundamental do estudo de confiabilidade.

Outros pesquisadores da área como, Leemis (1995), Fogliato e Ribeiro (2009) e Biorolini (2017), bem como a norma ABNT NBR-5462/1994, concordam entre si ao trazerem uma abordagem para confiabilidade como sendo uma probabilidade do item investigado de exercer adequadamente o seu propósito especificado, executando sua função necessária, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas.

Edmondson (2011), concorda com Werkema (2016) ao expor que o tratamento de não conformidades dentro de uma organização estimula a criação de um cenário de aprendizagem com tais falhas. Isto é, a possibilidade de aprender por meio de tais falhas permite a implementação de melhoria contínua aos processos, produtos ou serviços da empresa. Fernandes (2010), acrescenta que ao empreender melhorias no sistema ou produto de análise, é possível realizar comparações com o cenário anterior (sem melhoria) em vista de mensurar qual foi o ganho de confiabilidade obtido. Tal resultado viabiliza a concepção de um cenário propício para tomada de decisões acerca da validação do empreendimento.

Uma abordagem muito utilizada no contexto do estudo de falhas consiste na classificação da falha em três instâncias diferentes:

- Modo de falha
- Efeito de falha
- Causa de falha

Birolini (2017) traz uma definição bastante clara para cada um desses elementos de falha. O autor define o modo de falha como sendo a maneira em que a falha manifesta-se ao operário ou técnico de manutenção, geralmente sendo percebida por meio de inspeção sensitiva (visual, auditiva, tato e olfato). O efeito da falha, por sua vez, apresenta-se como uma consequência final da falha, também chamado de defeito resultante. Fogliato e Ribeiro (2009) também afirmam que o efeito de falha pode envolver diretamente a experiência do cliente com o produto, colocando em risco não somente a sua satisfação, mas principalmente a sua segurança.

Ainda, Fogliato e Ribeiro (2009) explanam que a causa de falha, por sua vez, está associada a origem real desta falha. Uma vez descoberta a razão verdadeira pela qual o item veio a apresentar defeito, é possível conter o problema em sua raiz. Esse tipo de estudo permite elevar os níveis de confiabilidade do equipamento ou sistema de modo que este execute sua missão conforme fora projetado.

Nesse seguimento, Smith (2017) chama a atenção para a necessidade de tratar os modos de falha de um determinado produto ou sistema separadamente. O objetivo do autor visa a aquisição de dados de taxa de falha para cada modo de falha em particular, objetivando sua implementação em análises de confiabilidade. No setor de PCM (Planejamento e Controle da Manutenção), a dificuldade desse processo se deve ao fato de que relatórios de campo com detalhes relevantes e suficientes é um desafio contínuo para a equipe de manutenção.

Para ilustrar a prática de desmembramento dos modo de falha, o autor apresenta o seguinte exemplo (figura 1):

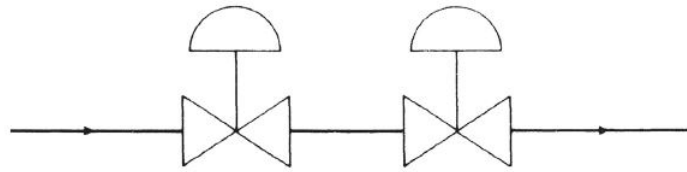


Figura 1 – Desmembramento dos modos de falha para duas válvulas no fluxo de suprimento. Fonte: (SMITH, 2017)

Suponha que para o sistema de válvulas em série (Figura 1), seja levantada por meio de um banco de dados, uma taxa de 15 falhas por milhão de horas para o sistema considerado. Todavia, ao levar em conta que o que pretende-se combater seja um problema de perda de suprimento da linha por falha na abertura da válvula, a taxa de falha para o sistema (considerando esse modo de falha em específico) seja de apenas 7 por milhão de horas. É possível inferir também que, pelo fato do sistema ter sua disposição em série, a taxa de falha do sistema (ainda considerando o modo de falha relativo ao defeito na abertura da válvula) é maior que a taxa de falha de uma válvula em particular, pois se uma válvula apresentar falha em sua missão de abertura para suprimento da linha, todo o sistema será prejudicado por decorrência da falha de um único item.

No entanto, ao considerar-se um modo de falha relativo ao vazamento da linha ou falha no fechamento da válvula, a situação muda completamente. Isto justifica-se pois, se uma válvula apresentar defeito e a próxima válvula da sequência não falhar, para este modo de falha em específico, o fato de existirem duas válvulas em série assegurará que a confiabilidade do sistema seja maior que a de uma válvula separadamente, o que difere da análise realizada ao considerar o modo de falha relativo ao defeito na abertura da válvula para o sistema disposto na mesma configuração em série.

Já para o modo de falha ilustrado como a ocorrência de sobrepessão da linha, a taxa de falha relativa pode ser de 3 por milhão de horas. Outros modos de falha, não citados neste exemplo, podem relacionar-se ao restante das taxas de falhas mensuradas pela *database* da empresa. Daí a necessidade de destrinchar os dados de falha, categorizando-os em classes diferentes de modos de falha observados. Essa divisão permitirá que tais informações coletadas sejam utilizadas dentro de algoritmos matemáticos objetivando mapear o nível de confiabilidade da unidade de análise ao longo de sua missão (SMITH, 2017).

Nesta direção, existem ferramentas que apresentam-se como importantes técnicas de confiabilidade voltadas para a análise de falhas, e são muito utilizadas no contexto da engenharia de produto e da engenharia de manutenção. Algumas destas ferramentas são:

- FMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falha, em português)
- FTA (Análise de Árvore de Falhas, em português)

- ACR (Análise de Causa Raiz)
- Diagrama de Ishikawa
- Série de Riscos

Mais à frente na seção 5.1.1, o Diagrama de Ishikawa bem como uma Série de Riscos serão implementados por meio de um estudo de caso, objetivando realizar uma análise sistemática acerca das falhas que acometem um determinado componente industrial, além de investigar-se quais os reais impactos induzidos pelas não conformidades detectadas sobre a linha produtiva. Os detalhes referentes as demais estratégias também empregadas na análise de falhas, fogem do escopo deste trabalho, no entanto podem ser encontrados nas obras de Fogliato e Ribeiro (2009) Fernandes (2010), Campos (1992) e Faria, Vieira e Peretti (2012).

2.1.1 Diagrama de Ishikawa

Nesta seção serão apresentados os pontos de maior relevância sobre o Diagrama de Ishikawa 6M, uma ferramenta de análise de falha bastante difundida em ambientes corporativos. Referências sobre sua origem, mecanismos e comparações com demais ferramentas serão exploradas neste tópico.

Também conhecido como Diagrama Espinha de Peixe ou Diagrama de Causa e Efeito, é uma ferramenta conhecida por vários autores que estabelece uma relação estreita entre análise de falha, controle de qualidade e gestão da manutenção. Assim como o FMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falha, em português), trata-se de uma ferramenta que pode ser explorada sistematicamente através de um *brainstorming* realizado por uma equipe de especialistas (GWIAZDA et al., 2006).

De acordo com Ishikawa (1982), criador da ferramenta em questão, o diagrama espinha de peixe possibilita levar em conta todos os possíveis fatores que podem ocasionar um determinado evento indesejado. Assim como a FTA (Análise de Árvore de Falhas), o diagrama causa e efeito permite identificar causas de falha ditas primárias, secundárias e assim sucessivamente por meio de um desdobramento e aprofundamento da análise realizada. O objetivo da ferramenta é semelhante ao da ACR (Análise de Causa Raiz): encontrar a(s) verdadeira(s) causa(s) raiz(es) ligada(s) a uma não conformidade.

Ainda Gwiazda et al. (2006) apresentam que, uma abordagem bastante utilizada para a construção do diagrama de Ishikawa é o modelo 6M. Trata-se uma classificação de seis esferas ou categorias dentro das quais busca-se elencar as possíveis falhas que podem ter levado a ocorrência do efeito indesejado. Tais categorias são: material, máquina, mão-de-obra, método, medida e meio ambiente. Na figura 2 é possível visualizar um modelo estrutural da ferramenta de análise.

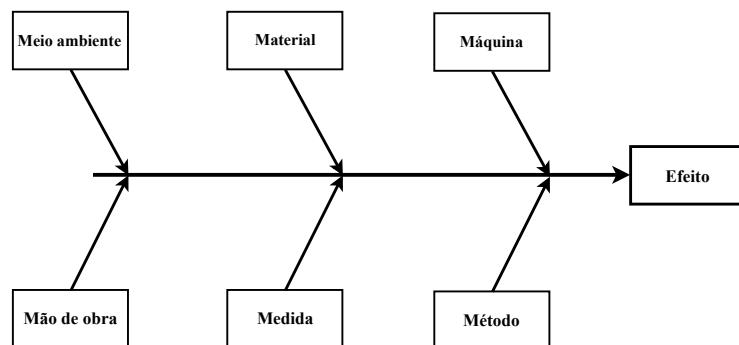


Figura 2 – Estrutura básica do Diagrama de Ishikawa 6M. Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

2.1.2 Série de Riscos

A Série de Riscos é uma ferramenta de análise de riscos em termos da aparição de falhas, tomando como escopo de análise desde o nível de componente, até o nível de macro-sistemas. É uma estratégia amplamente difundida em tomadas de decisão num ambiente corporativo, e terá seus principais pontos revisados nesta seção.

A ferramenta de da Série de Riscos é utilizada na prática na forma de um fluxograma que relaciona eventos de não conformidades através de operadores lógicos "e" e "ou" (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009). Segundo o autor, as falhas que encontram-se conectadas por meio de um operador lógico "e", necessitam ocorrer simultaneamente para que seja induzida uma nova falha na sequencia. Em contrapartida, aquelas falhas que estão ligadas por meio do operador lógico "ou", não necessitam de ocorrer paralelamente. Dessa forma, são chamados de eventos independentes, onde apenas uma ocorrência de falha é suficiente para ocasionar outra mais adiante. Este mecanismo de propagação é bastante comparado geometricamente com um sistema em série-puro, onde o funcionamento do sistema total depende do pleno funcionamento de cada componente integrante.

A Série de Riscos é dividida basicamente em seis elementos formadores: (i) Risco inicial; (ii) Riscos contribuintes; (iii) Eventos principais; (iv) Eventos catastróficos; (v) Inibições; e (vi) Operadores lógicos relacionais (SOUZA, 2000). O Risco Inicial diz respeito àquele que deu origem à série de propagação de não conformidades. Posteriormente, o risco que influencia direta ou indiretamente a reprodução de falhas, é chamado de risco contribuinte. O Evento Principal, por sua vez, é caracterizado por estar intimamente conectado com a causa do Evento Catastrófico. Este, faz menção ao evento prejudicial e indesejado principal em termos de danos ocasionados a pessoas, equipamentos e meio ambiente.

2.1.3 Tipos de Falha

Fogliato e Ribeiro (2009) apresentam dois tipos de falha tendo em vista dois momentos diferentes ao longo do tempo de operação de um equipamento:

- Falha Potencial
- Falha Funcional

Tais autores descrevem falha potencial em concordância com o conceito de modo de falha apresentado neste trabalho por Smith (2017). Eles elucidam que a falha potencial diz respeito ao modo como a falha manifesta-se no componente, tendo por característica apresentar-se como uma avaria percebida ainda em seu estágio inicial. Dessa forma, Dutra (2019) alega que o ponto no tempo de operação do componente no qual a falha pode ser percebida sem que o funcionamento do equipamento seja prejudicado é caracterizado como o ponto potencial de falha.

Fogliato e Ribeiro (2009) complementam a observação de Dutra (2019) ao afirmarem que a falha funcional, por sua vez, impossibilita que o padrão de performance que fora especificado para o equipamento ou sistema seja alcançado. Em outras palavras, uma vez acometido de falha funcional, um equipamento pode apresentar uma redução considerável em seu nível de confiabilidade, inviabilizando a execução de sua função conforme lhe é requerido.

No contexto de uma fábrica, a falha funcional de um componente pode acarretar na interrupção do funcionamento de uma máquina. Por sua vez, isso pode ocasionar uma paralisação total da linha de produção. Nesse ponto, o lucro cessante, que representa a receita que a empresa deixa de auferir por incapacidade de produzir devido a indisponibilidade da linha, representa uma das maiores parcelas do prejuízo ligadas à ocorrência da falha funcional. A falha funcional de um ativo físico pode também causar interferência no padrão da qualidade de sua produção, sem que haja possibilidade da recuperação dessa manufatura via reprocessamento do produto. Tal cenário pode causar ainda acidentes de trabalho, representando riscos à saúde do funcionário de chão de fábrica, bem como ameaças de contaminação do meio ambiente (DUTRA, 2019).

Nesta mesma direção, Dutra (2019) elucidada que mapear o ponto potencial de falha do componente representa uma estratégia poderosa em ordem de diminuir os custos de operação da linha produtiva, visto que os custos de manutenção estão inclusos no dispendio operacional da empresa (ver seção 2.4). O autor afirma que isso se deve ao fato de que quando uma falha funcional manifesta-se, na grande maioria dos casos, os custos envolvidos na recolocação desse ativo em operação são em média cinco vezes mais altos se comparado com o cenário em que a intervenção de manutenção ocorresse ainda no ponto inicial da falha.

Uma abordagem detalhada sobre as principais estratégias de manutenção utilizadas no setor industrial será discutida na seção 2.2. Tal análise terá como uma das bases de explanação a norma ABNT NBR 5462:1994, além de notáveis referências do assunto. Os conceitos de falha potencial e funcional também serão explorados por meio da análise gráfica da Curva PF (que contrasta no plano cartesiano informações relativas à performance em detrimento do tempo de operação do ativo), apresentada na seção 2.1.4.

2.1.4 Curva de Falha Potencial (PF)

De acordo com Levitt (2000), a Curva de Falha Potencial ou em inglês, *Potential Failure Curve* (PF), contrasta num plano cartesiano o nível de performance de um equipamento ou sistema em detrimento do seu tempo de operação. A Curva PF é considerada uma ferramenta essencial visando estabelecer um plano de manutenção que seja baseado na confiabilidade dos ativos (Isto é, Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC)), pois uma vez que o processo de degradação do item é monitorado, é possível realizar recomendações de qual estratégia de manutenção melhor se aplica para cada caso (MOUBRAY, 1996).

Uma vez localizados os pontos de falha potencial e funcional (seção 2.1.3) sobre o tempo de operação do equipamento, torna-se possível, tão logo, identificar o intervalo PF (compreendido entre o ponto de falha potencial e funcional). Tal entremeio remete exatamente à distancia temporal entre as ocorrências dos dois tipos de falha. Dutra (2019) acrescenta que localizar o intervalo PF permite planejar e programar atividades de intervenção de manutenção antes que o ativo venha ser acometido por uma falha funcional, tudo isso em vista de manter os níveis de confiabilidade das máquinas, e consequentemente, da linha de produção dentro das especificações de segurança e de qualidade da empresa. Na figura 3, a Curva PF (Curva de Falha Potencial) é exibida dando destaque para o intervalo compreendido entre o ponto de falha potencial e funcional.

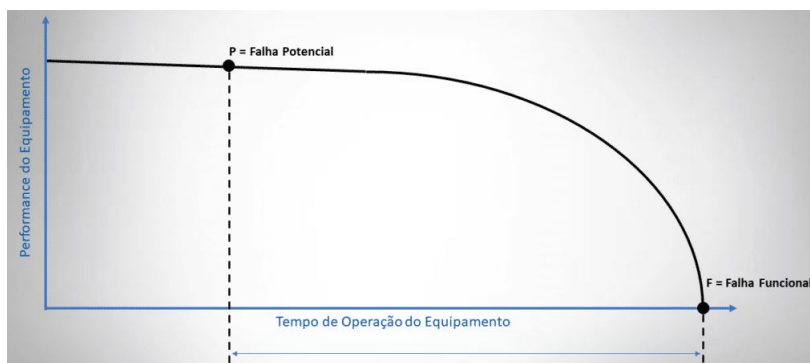


Figura 3 – Relação entre performance e tempo de operação do equipamento. Fonte: (DUTRA, 2019)

2.2 Um paralelo entre Confiabilidade e Manutenibilidade

A norma ABNT NBR 5462:1994 dispõe especificamente a respeito da relação entre confiabilidade e manutenibilidade, e elucida o termo manutenibilidade como uma medida de desempenho da manutenção tal qual como a "capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas". Em outras palavras, o setor de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) é responsável por elevar e manter os níveis de confiabilidade dos equipamentos da empresa. Além disso, quando o modelo *Lean Manufacturing* é adotado como medida de gerenciamento do setor de PCM, as ações praticadas propendem na direção da contenção de desperdícios de tempo, materiais e custo (VIANA, 2002).

A conexão entre confiabilidade e manutenção também é evidenciada ainda no nascimento de um produto (isto é, no Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP)). Singh et al. (2013) elucidam que antes mesmo de um produto nascer, este necessita abranger, ainda em seu estágio de projeto, o propósito de facilitar suas futuras atividades de manutenção. Dutra (2019) concorda com Singh et al. (2013) ao afirmar que um produto deve ser projetado de modo a ser constituído por um conjunto de componentes que goze de um mecanismo de montagem e desmontagem à prova de erros (ao aplicar ferramentas como o Poka Yoke, inerente à filosofia industrial *Kaizen*, objeto do modelo *Lean* de gestão). Nesta mesma direção, Alcaraz et al. (2014) elucida que manter os ativos físicos confiáveis e, portanto, disponíveis permite que o Planejamento e Controle da Produção (PCP) esteja harmonicamente conectado com a demanda dos consumidores sob os moldes do *Just in Time*, fomentando a hipótese de zero desperdício e de um custo operacional otimizado dentro da companhia.

Ainda segundo Dutra (2019), outra medida de simplificação da manutenção de um produto traduz-se na adoção de uma quantidade de componentes otimizada. O objetivo é tornar a atividade de manutenção descomplicada, auxiliando o encarregado de manutenção a proceder com as instruções presentes no plano de inspeção e manutenção intuitivamente, além de permiti-lo realizar tomada de decisões em tempo hábil.

A norma ABNT NBR 5462:1994 elenca três principais tipos de manutenção: reativa (corretiva não-programada), preventiva e preditiva.

2.2.1 Manutenção Reativa

A norma ABNT NBR 5462/1994 introduz a manutenção do tipo reativa como uma atividade de intervenção de manutenção executada após uma falha funcional, visando recolocar um item em condições de executar sua função requerida. Conforme Dutra (2019), a estratégia da manutenção reativa é majoritariamente praticada pelas empresas brasileiras, e é considerada pelos especialistas como sendo o modelo de manutenção mais caro

quando comparado com as demais estratégias. Uma abordagem focada na análise dos custos inseridos em atividades de confiabilidade no Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) será apresentada na seção 2.4.3.

Ainda segundo o autor, a manutenção reativa (ou corretiva não-programada) caracteriza-se por ser a estratégia de manutenção mais cara (em relação a preventiva e preditiva) pelo fato dela avançar as etapas de planejamento e programação da manutenção, causando perdas por interrupção da manufatura (indisponibilidade do equipamento), além de outros desperdícios como materiais, tempo e capital, é o que expõe Xenos (1998). Dutra (2019) concorda com Xenos (1998) acrescentando que o alto dispêndio causado pela manutenção reativa também deve-se à danos auxiliares que traduzem-se no desgaste ou quebra de componentes vizinhos por ocorrência de uma falha antecessora, além de gastos de cunho emergencial.

Dutra (2019) conclui ao expor que a estratégia de manutenção reativa só é viável quando implementada sob alguns cenários específicos. Tais cenários são listados a seguir, considerando que a ocorrência de falha: (i) não causa danos à segurança do operário ou ao meio ambiente; (ii) não acarreta na descontinuação do processo produtivo; (iii) não causa interferência no padrão de qualidade. Ainda, segundo o autor, a manutenção reativa pode ser implementada nos cenários nos quais há equipamentos reservas para substituição imediata ou ainda quando os custos de manutenção corretiva não ultrapassam mais que 10% dos custos mensais da manutenção total.

2.2.2 Manutenção Preventiva

De acordo com a norma ABNT NBR 5462/1994, a manutenção preventiva é implementada em intervalos pré-determinados de tempo ou segundo critérios previamente estabelecidos, tendo por objetivo reduzir a probabilidade do equipamento encontrar-se indisponível para produzir por decorrência de falha em seus componentes.

Dutra (2019) elucida que esse tipo de manutenção apresenta um custo em média três vezes maior que aqueles praticados pela manutenção preditiva. Tal custo justifica-se pelo fato da reposição ou reparo dos componentes usualmente ocorrer antes do final do período de sua vida útil, sendo que apenas 11% dos componentes apresentam um desgaste relacionado ao tempo de uso (por envelhecimento temporal) e não referente ao modo de uso (ao levar-se em conta as solicitações de esforços impostas ao componente em sua operação), é o que elucida Taylor (1986).

Comparativamente, os custos da estratégia preventiva de manutenção são também menores do que aqueles praticados pela manutenção reativa, por motivo de existir a possibilidade de planejar a parada do equipamento, somado ao fato da probabilidade de ocorrência de danos auxiliares devido ao evento de uma falha funcional ser, de igual modo,

menor (VIANA, 2002).

2.2.3 Manutenção Preditiva

A norma ABNT NBR 5462/1994 introduz a estratégia preditiva da manutenção como um modelo baseado na implementação de técnicas de análise da condição (ou estado) do item, implementadas por meio da utilização de aparelhos apropriados em vista de realizar-se inspeções instrumentadas, ou mesmo por via de inspeção sensitiva. O objetivo de tal estratégia é diminuir o uso da manutenção corretiva e preventiva, mediante o prognóstico da necessidade comprovada de reposição ou substituição de um componente devido ao monitoramento do seu processo de degradação. Isto é, trata-se de uma estratégia de manutenção que visa otimizar o modelo preventivo (baseado no tempo) de manutenção dos ativos, pois de acordo com Xenos (1998), a manutenção preditiva permite uma utilização mais eficiente da vida útil do componente.

Dutra (2019) concorda com Xenos (1998) ao afirmar que por via da implantação da estratégia preditiva da manutenção, os equipamentos apresentam um maior índice de disponibilidade para produzirem, o que, de acordo com o autor, influencia no aumento da Eficiência Global do Equipamento (indicativo de performance utilizado para controle da produtividade). Outra vantagem elucidada por Dutra (2019) referente ao modelo preditivo, traduz-se na possibilidade de realizar inspeções dos equipamentos sem que haja a necessidade de interromper o seu funcionamento.

Nesta mesma direção, Viana (2002) e Dutra (2019) afirmam que, em ordem de identificar o intervalo PF (intervalo de tempo compreendido entre a falha potencial e funcional) algumas instrumentações específicas inerentes à estratégia de manutenção preditiva podem ser utilizadas. Algumas das principais técnicas de monitoramento do processo de degradação de equipamentos são elencadas a seguir:

- Análise de temperatura ou Termografia
- Análise de vibração ou Acelerometria
- Análise de Ultrassom ou Ultrassonografia
- Análise das propriedades físico-químicas de óleo lubrificante;

A Curva PF (Curva de Falha Potencial) também pode ser apresentada em contraste com as aplicações das estratégias de manutenção do tipo reativa, preventiva e preditiva (Figura 4). Na imagem é possível perceber que o modelo preditivo de manutenção (área em verde) possibilita programar a intervenção de manutenção bem proximamente ao ponto de falha potencial, momento este compreendido como sendo o estágio inicial da

falha, o que possibilita, por sua vez, diminuir ao máximo os custos de manutenção praticados. No entanto, os desafios desta estratégia de manutenção estão ligados ao investimento próprio da implantação na linha produtiva da tecnologia de monitoramento do processo de deterioração do componente (DUTRA, 2019).

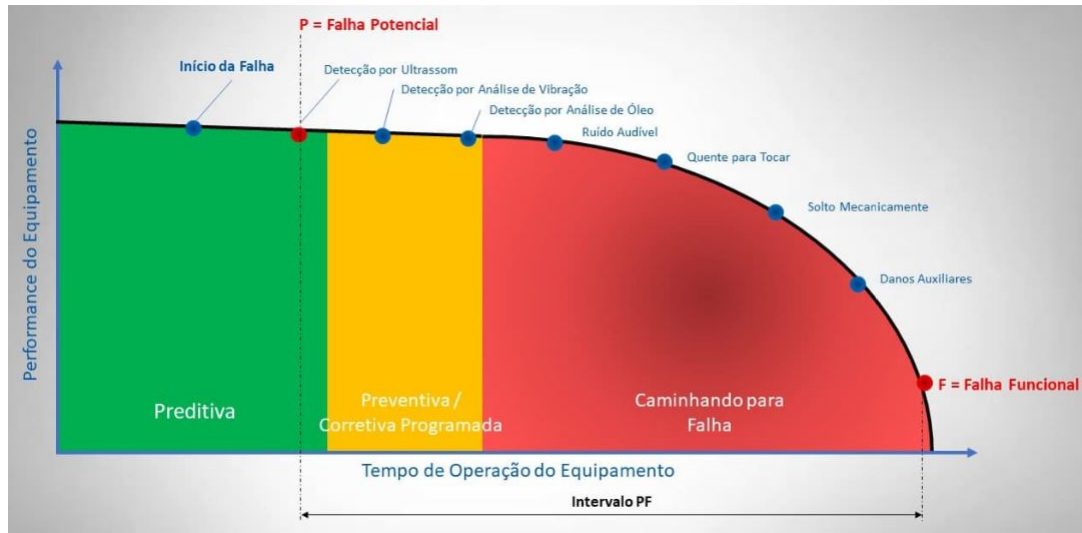


Figura 4 – Curva de Falha Potencial e as estratégias de manutenção. Fonte: (DUTRA, 2019)

2.2.4 Manutenção Centrada em Confiabilidade

Nesta seção serão explorados os principais pontos identificadores da Manutenção Centrada em Confiabilidade, bem como as particularidades que enaltece esta estratégia de manutenção em detrimento da manutenção puramente de caráter reativo, preventivo e preditivo.

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), diferentemente das outras estratégias de manutenção (reativa, preventiva e preditiva) apresentadas nas seções anteriores, não focaliza, em primeira instância, no custo relativo a manutenção dos ativos da empresa. Embora a implantação da MCC permita com que as empresas ampliem a disponibilidade dos ativos e reduzam os custos ligados a ocorrências de acidentes, defeitos, reparos e substituições, na verdade, a contenção de dispêndios relativos às atividades de manutenção é apenas um subproduto de ações tomadas na direção de assegurar que os componentes, conjuntos e sistemas da planta fabril tenham suas funções especificadas mantidas (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009).

Moubray (1996) elucida que a MCC tem como base para a sua implantação a FMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falha, em português), ao buscar responder algumas das questões como: de que modo os equipamentos podem ser acometidos por falha? Qual a causa da falha? Qual a consequência da falha? No entanto, a identificação das

funções bem como do padrão de desempenho que é aguardado para os equipamentos, configura a abordagem mais importante para a MCC (Manutenção Centrada em Confiabilidade). Nessa direção, [Fogliato e Ribeiro \(2009\)](#) afirmam que não apenas as funções primárias (aquelas que o equipamento deve atender em primeiro lugar, geralmente ligadas para "o que" deve ser desempenhado) devem ser tratadas nesta análise, mas também as funções ditas secundárias (aquelas que estão em segundo plano, comumente ligadas a "como" tais funções necessitam ser realizadas) devem ser devidamente identificadas de modo a orientar o programa de MCC.

Dessa maneira, questões como "de que forma cada falha interessa" são extremamente importantes para a MCC, pois somente a partir da identificação das falhas consideradas mais críticas, é possível estabelecer ações pró-ativas (preventivas ou preditivas) de manutenção ([FOGLIATO; RIBEIRO, 2009](#)). Tal raciocínio tem total ligação com a abordagem realizada por [Smith \(2017\)](#) na seção 2.1, ao chamar a atenção para a necessidade de desagregar as taxas de falha do equipamento, conjunto ou sistema em modos de falha diferentes, em vista de elucidar quais destas falhas apresentam um impacto mais crítico e, portanto, estabelecer assim uma ordem de prioridade para a contenção de tais falhas. Nesta mesma direção,

[Dutra \(2019\)](#) afirma que além da FMEA (que traz em sua abordagem sistemática a mensuração do risco associado a cada falha), outra ferramenta que pode auxiliar no levantamento do nível da criticidade dos ativos é a matriz de criticidades. A matriz de criticidades realiza um estudo clínico das consequências das falhas tendo em vista os cenários como: segurança e meio ambiente, produção, qualidade, custo de manutenção e equipamento reserva. Mais detalhes referentes a matriz de criticidades fogem do escopo desse trabalho, sendo recomendada a obra de [Dutra \(2019\)](#) para aprofundamento no assunto.

Finalmente, a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) também trata sobre a estratégia a ser adotada quando não é possível ou proveitoso (financeiramente) executar alguma ação de manutenção de caráter pró-ativo (ação que antecede a ocorrência da falha), de modo efetivo. Nesta direção, [Fogliato e Ribeiro \(2009\)](#) elucidam que a manutenção reativa acaba tornando-se a estratégia empreendida, o que implica em programar a intervenção de manutenção do componente somente após a sua falha funcional, isto é, rodar o item até a falha e, posteriormente, consertá-lo ou substituí-lo.

Nomes como [Moubray \(1996\)](#), [Rausand \(1998\)](#) e [Fogliato e Ribeiro \(2009\)](#) explicam os principais pilares de apoio para a implantação da MCC, obras nas quais podem ser encontradas informações detalhadas sobre cada tópico listado a seguir:

1. Escolha de uma comissão para o trabalho;
2. Treinamento em MCC da equipe de trabalho;

3. Definição dos requisitos de confiabilidade;
4. Definição de uma sólida base de dados;
5. Execução da FMEA;
6. Hierarquização dos ativos;
7. Levantamento das ações pró-ativas (preventivas e preditivas) ou reativas de manutenção;
8. Documentação das atividades de manutenção;
9. Definição de metas e indicadores para controle da manutenção;
10. Revisão do programa de MCC;

Todos esses pontos são igualmente importantes para a implantação do MCC, apresentando-se todos como colunas iguais de sustentação para o programa. Todavia, o presente trabalho chama a atenção para os itens 3 (definição dos requisitos de confiabilidade), 4 (definição de uma sólida base de dados), 8 (documentação das atividades de manutenção), 9 (definição de metas e indicadores para controle da manutenção) e 10 (reavaliação do programa de MCC).

Em vista de implantar o modelo da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), faz-se necessário estabelecer qual a confiabilidade aguardada para cada um dos equipamentos da planta fabril. Dutra (2019) acrescenta que toda essa determinação deve ser realizada tendo em vista o atingimento de metas de caráter específico, mensurável, atingível, relevante e vinculado a um prazo para cumprimento. O levantamento destas metas devem girar em torno do objetivo de impedir falhas que: causem danos para os trabalhadores; prejuízos ao meio ambiente (incluindo dispêndios relativos à infrações por descumprimento de normais ambientais); danos materiais consideráveis. Tais metas configuram uma intersecção entre os objetivos buscados pela MCC e MPT (Manutenção Produtiva Total), sendo esta, objeto da filosofia *Lean Manufacturing* de gestão, além do modelo de controle de processos *Seis Sigma*, no que tange o atingimento de zero acidente, zero defeito de qualidade e zero quebra (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009).

A definição da confiabilidade esperada dos equipamentos deve ser preferencialmente trabalhada em cima daqueles itens considerados como gargalos na linha produtiva (itens cuja interrupção de seu funcionamento devido a falha funcional ocasiona a parada de outros equipamentos ou mesmo de toda a linha). É possível concluir que, no contexto da MCC, as atividades de manutenção são inteiramente dependentes do estudo de confiabilidade realizado para os equipamentos, conjuntos ou sistemas, devendo ser planejadas

somente após serem definidas as metas de confiabilidade para cada ativo (MOUBRAY, 1996).

Para tanto (em vista de quantificar a confiabilidade associada aos itens da planta fabril), faz-se necessário estabelecer na empresa uma base de dados sólida que sirva como um acervo de informações relativas as ocorrências de falha de cada item. Conforme Dutra (2019) e Fogliato e Ribeiro (2009), esse registro deve obedecer a estrutura de hierarquia da planta fabril (planta, área, sub-área, linha, máquina, conjunto, equipamento e componente).

Além disso, informações detalhadas referentes ao momento de ocorrência da falha, bem como aquelas ligadas a taxonomia da falha (modo, causa e efeito), classificação de origem da falha (mecânica, elétrica, hidráulica, etc.), classificação quanto à criticidade (crítica ou potencialmente crítica) e tipo de ação de manutenção empreendida (preventiva, preditiva e reativa), devem ser indicadas no referido registro. Tais dados (de ocorrência de falhas) servirão como base para executar estudos de engenharia no que diz respeito a estimativa de taxas de falhas e mensuração da confiabilidade associada a missão de cada equipamento ou sistema dentro da empresa (MOUBRAY, 1996).

Fogliato e Ribeiro (2009) defende que no campo das ações pró-ativas (preditiva e preventiva), as atividades baseadas no monitoramento da condição do item (ou do desgaste apresentado devido ao uso), isto é, a manutenção preditiva, deve ser priorizada, pois orienta a intervenção de manutenção apenas para quando é necessário (aproveitando ao máximo a vida útil do componente). No entanto, para os casos em que a aplicação da preditiva é inviável (geralmente devido ao custo elevado relativo a medições e análises via instrumentações específicas tais como: inspeção termográfica, acelerometria, análise de óleo, etc.), recomenda-se a implementação da estratégia preventiva (baseada no tempo).

Nesta direção, uma vez tendo acesso a resultados de confiabilidade estimados pelo comitê de engenheiros (partindo da base de dados de ocorrências de falhas), é possível pré-determinar a periodicidade de cada intervenção de reparo ou substituição do componente. Fogliato e Ribeiro (2009) afirmam que esses intervalos de tempo pré-determinados devem derivar-se da análise da distribuição de probabilidade condicional de falha estimada ao longo do estudo de confiabilidade. Além deste método, a aplicação da média (na seção 2.5.10, tal média será designada por MTBF para itens reparáveis, e MTTF para não reparáveis) da distribuição de probabilidade ajustada para os dados de falha pode ser empregada na definição da periodicidade das atividades de manutenção preventiva. Algumas referências como Dutra (2019) aponta que, em geral, a frequência das atividades de inspeção podem ser realizadas tomando um percentual de 70% do MTBF (tempo médio entre falha, em português) do item a ser mantido.

De acordo com Filho (2006), uma vez possuindo o registro do que foi feito em termos de manutenção dos ativos, é possível definir alguns indicadores que servirão como

base para a gestão do programa de MCC. [Dutra \(2019\)](#) concorda ao afirmar que possuir um conjunto sólido e confiável de indicadores, possibilita avaliar o real avanço na direção do atingimento das metas estipuladas. Indicadores de performance (KPI's) podem ser incorporados na gestão do controle dos processos de manutenção. A seguir estão listados os indicadores mais usuais no contexto da engenharia de manutenção:

- Confiabilidade
- Taxa de falha
- MTTF (tempo médio para falha, em português, para itens não-reparáveis)
- Disponibilidade Inerente
- Distribuição de atividades por tipo de manutenção (preditiva, preventiva ou reativa)

No entanto, a apresentação dos KPI's (indicadores de performance, em português) não constitui parte do escopo desta obra, sendo recomendados os trabalhos de [Filho \(2006\)](#), ([DUTRA, 2019](#)) e [Marr \(2012\)](#) para acesso a informações detalhadas sobre o assunto.

Assim como todo empreendimento tende a evoluir-se com o tempo, com a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) não é diferente. [Fogliato e Ribeiro \(2009\)](#) elucidam que os parâmetros definidos para confiabilidade esperada dos itens bem como os procedimentos e a periodicidade de manutenção devem ser reavaliados regularmente. Isso justifica-se através do descobrimento de novos modos de falha (anteriormente desconhecidos), mudança da matéria-prima (por troca de fornecedor), tecnologias novas empregadas, inserção de equipamentos e componentes novos, o que direciona para a necessidade de reajustar o programa de MCC. Nesta direção, metodologias de gestão de processos como o ciclo PDCA e DMAIC configuram ferramentas cruciais em vista de conferir melhoria contínua aos processos e ativos, em virtude da necessidade de realizar uma revisão periódica do programa de manutenção.

Por fim, como um facilitador para a gestão da MCC, um traçado pode ser elaborado tendo em vista auxiliar na definição da estratégia de manutenção mais adequada para cada componente, levando-se em conta o modo de falha que pretende-se ater para a realização da análise. Tal traçado, é denominado por [Fogliato e Ribeiro \(2009\)](#) de Diagrama de Verificação da Atividade Recomendada, também comumente chamado de Diagrama de decisão da MCC, e é apresentado por meio da Figura 5.

Como pode ser observado por meio da Figura 5, há uma ordem preferencial para a adoção da estratégia de manutenção. Como fora sustentado no início desta seção, tal ordem é embasada primeiramente tendo em vista os efeitos das falhas (que podem comprometer principalmente o atendimento das funções especificadas para o item), e em segunda

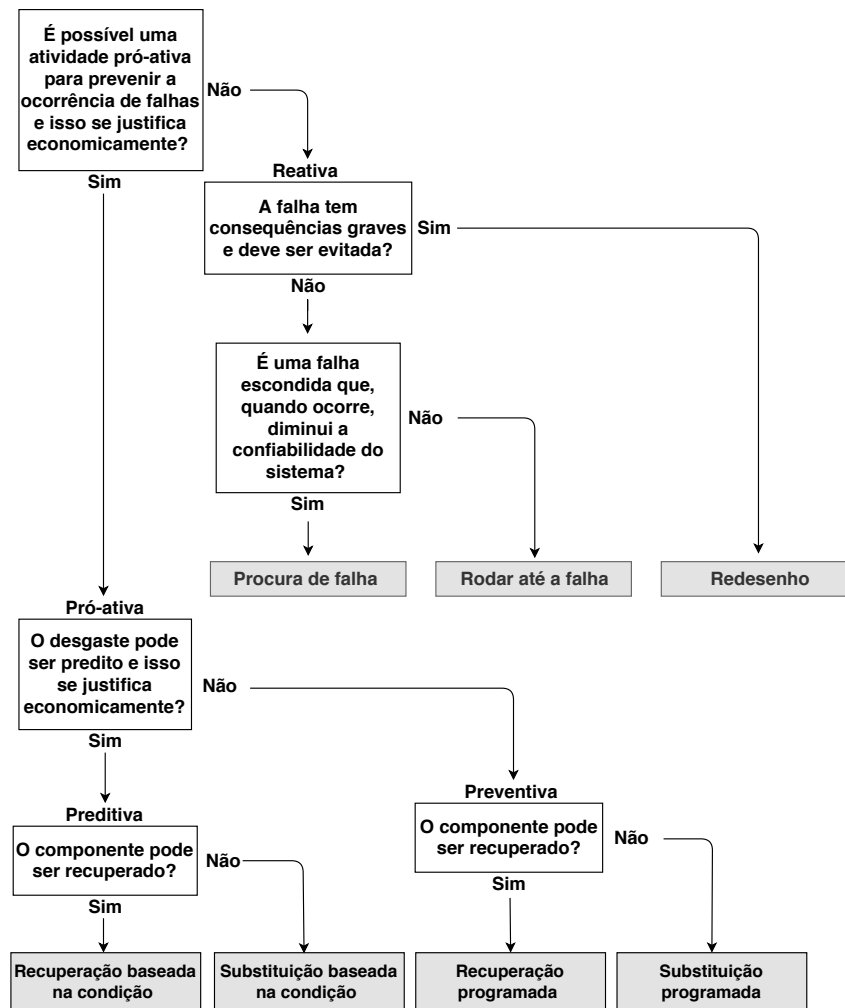


Figura 5 – Diagrama de decisão referente ao tipo de atividade de manutenção recomendada. Fonte: Adaptado de (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009)

instância, pode estar associada ao custo próprio da recolocação do ativo em condições de operar novamente. Assim sendo, a ordem de primazia da estratégia de manutenção a ser implantada, é elencada como a seguir (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009):

1. Recuperação baseada na condição ou estratégia preditiva para reparo;
2. Substituição baseada na condição ou estratégia preditiva para substituição;
3. Recuperação programada ou estratégia preventiva para reparo;
4. Substituição programada ou estratégia preventiva para substituição;
5. Estratégia reativa: procura periódica por falhas;
6. Estratégia reativa: rodar até a falha;
7. Estratégia reativa: redesenho do item;

2.3 Um paralelo entre Confiabilidade e Qualidade

De acordo com [Smith \(2017\)](#), confiabilidade, qualidade e análise de falhas estão diretamente relacionadas. [Fogliato e Ribeiro \(2009\)](#) concordam com [Smith \(2017\)](#) ao apresentarem a confiabilidade como sendo uma característica da qualidade a ser analisada num produto ou prestação de serviço. Também os autores [Smith \(2017\)](#) e [Birolini \(2017\)](#) concordam entre si ao enunciarem qualidade como a medida em que determinadas características de um produto conformam-se com os requisitos elencados por meio da voz do cliente. Tal definição tem como base principal os textos das normas de Gestão da Qualidade ISO 9000:2000, no entanto, a explanação das referidas normas foge do escopo do presente trabalho.

[Fogliato e Ribeiro \(2009\)](#) apresentam qualidade como sendo uma descrição estática de um componente, equipamento ou sistema. [Smith \(2017\)](#), por sua vez, acrescenta, ao interpretar confiabilidade como sendo uma descrição dinâmica do item de análise em função do seu tempo de operação. Isto é, a confiabilidade pode ser introduzida como uma extensão da análise acerca da qualidade ao longo do tempo.

O estudo da qualidade também possui uma definição de cunho estatístico voltada para a estratégia de controlar os índices de variabilidade de processos industriais. Dessa forma, o Controle Estatístico de Processo (CEP) torna-se uma ferramenta analítica crucial em vista de auxiliar na garantia da política de zero defeitos e na diminuição de desperdícios numa organização, é o que afirma [Montgomery \(2018\)](#).

Como apresentado na seção 2.4, o Controle Estatístico de Processo (CEP) configura uma técnica indispensável para o Planejamento e Controle da Produção (PCP), tendo em vista a realização da análise de confiabilidade dos processos de manufatura da fábrica. Segundo, [\(MOUBRAY, 1996\)](#), quanto mais confiáveis forem os ativos da planta fabril, mais controláveis tendem a ser os processos de produção, e por sua vez, menos dispersos tendem a ser os resultados de qualidade da manufatura. No entanto, a análise inversa também é válida: quanto menor for a confiabilidade dos equipamentos e sistemas da linha produtiva, maior se torna a tendência de produzir-se refugos (peças fora do padrão da qualidade), e portanto, mais recorrente torna-se a variação dos processos para além dos níveis de limite de controle e de especificação da produção ([MONTGOMERY, 2018](#)).

Outra ferramenta muito difundida no meio corporativo é QFD (Desdobramento da Função Qualidade, numa tradução livre para o português). O presente trabalho visa atribuir uma atenção especial para a Função de Desdobramento da Qualidade (QFD). Para um aprofundamento acerca das demais ferramentas listadas, sugere-se os trabalhos de [Samohyl \(2009\)](#) e [Montgomery \(2018\)](#).

2.3.1 Desdobramento da Função Qualidade QFD

Também conhecido como Casa da Qualidade, o QFD é uma ferramenta que visa contrastar os principais requisitos do consumidor para um produto ou serviço frente as limitações de ordem econômica e técnica do empreendimento. Nessa direção, torna-se possível levantar os requisitos de confiabilidade, visando estabelecer diretrizes de validação e homologação para o cumprimento dos requisitos de projeto estabelecidos a nível de engenharia.

De acordo com [Chan e Wu \(2002\)](#), o QFD também objetiva estabelecer ações que direcionam o atingimento de metas ligadas a criação ou melhoramento de um produto. [Fogliato e Ribeiro \(2009\)](#) ainda acrescentam que o cliente pode encontrar-se inserido em diversas categorias de consumidores. [Dutra \(2019\)](#) complementa que no contexto da engenharia de manutenção, o setor de Planejamento e Controle da Manutenção vende para o setor do Planejamento e Controle da Produção (PCP) disponibilidade e confiabilidade a baixo custo, sendo este a representação do cliente para o PCM.

Em sua forma construtiva, o QFD possui elementos de correlação entre requisitos de cliente e de produto definidos em três categorias: fraco, forte e moderado. Este elemento correlator ainda pode ser caracterizado como: positivo forte; positivo fraco; inexistente; negativo forte; e negativo fraco. Outro elemento utilizado na análise do QFD é direcionador de melhoria, medido em termos dos requisitos levantados, onde há também três interpretações: quanto maior o valor melhor; quanto menor o valor melhor; e variação sem efeito de valor.

Na seção [5.1.1](#), um Desdobramento da Função Qualidade (QFD) será implementado, assumindo como figura do cliente, os setores de PCM e PCP da fábrica de embalagens recicláveis. O caminho a ser percorrido traduz-se em ouvir a voz do cliente alvo da análise pretendida e convertê-las em informações técnicas em nível de engenharia, estabelecendo os principais atributos de performance, qualidade e segurança para o componente que será instrumento do estudo de caso da seção [5.1.1](#).

2.4 Um paralelo entre Confiabilidade e Custo

A relação custo-confiabilidade verifica-se de várias formas. Com base na opinião de especialistas como [Dutra \(2019\)](#) e [Filho \(2006\)](#), essa análise pode ser realizada com base em três contextos diferentes:

- Processo de Desenvolvimentos de Produtos (PDP);
- Planejamento e Controle da Produção (PCP);
- Planejamento e Controle da Manutenção (PCM);

Um enfoque maior será dado para o setor de PCM, objetivando um alinhamento com os objetivos apresentados neste trabalho.

2.4.1 Análise de custos inseridos em atividades de confiabilidade no PDP

Conforme [Fernandes \(2010\)](#), no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP), quanto maior for a confiabilidade atribuída a um produto ou sistema objeto de desenvolvimento, menores serão as taxas de ocorrências de falhas não previstas (como discutido na seção 2.1), considerando o prazo de vida útil estimado para o produto. Por consequência, menor tende a ser o gasto da empresa com custos relativos a garantia de produtos como política de assistência ao cliente.

Da mesma forma, o atendimento a requisitos dos clientes como durabilidade, conforto, segurança, boa manutenibilidade, entre outros, também estão intimamente ligados à capacidade de fidelização do cliente, o que fomenta o pioneirismo econômico de uma empresa em detrimento de outra. No entanto, um custoso desafio persiste no curso de assegurar um alto nível de confiabilidade para um determinado produto, haja vista que superdimensionar componentes pode ocasionar danos aos cofres da empresa. Nesse sentido, a economia atual foca no atingimento do equilíbrio entre duas partes: dar vida a produtos que garantam segurança, bem-estar e máxima satisfação do usuário, ao passo que lance mãos de estratégias de produção que culmine na minimização de custos de desenvolvimento de produtos ([DÜPOW; BLOUNT, 1997](#)).

2.4.2 Análise de custos inseridos em atividades de confiabilidade no PCP

No contexto do Planejamento e Controle da Produção (PCP), [Samohyl \(2009\)](#) explana que a confiabilidade associada aos processos de manufatura auxilia diretamente a empresa na política de controle estatístico de seus processos produtivos (CEP). [Dutra \(2019\)](#) concorda com [Samohyl \(2009\)](#) ao afirmar que manter as máquinas responsáveis pela produção confiáveis promove o atingimento de uma menor taxa de variabilidade dos índices de qualidade da manufatura (isto é, uma menor taxa de refugos ou itens descartáveis).

Dispêndios relativos a perda de unidades fora da especificação de qualidade além de custos pertinentes ao reprocessamento do produto tais como gastos com insumos, ferramentas, logística e pessoal necessários para a restauração do manufaturado (para os casos em que há essa possibilidade), representam os principais gastos associados ao PDP em termos do deficit nos níveis de confiabilidade dos processos de manufatura. Nesta mesma direção, [Montgomery \(2018\)](#) expõe que o modelo *Seis Sigma* aliado ao Controle Estatístico de Processo (CEP) apresenta-se como uma importante ferramenta de monitoramento e controle da dispersão da produção, objetivando atingir um cenário

de zero defeito na manufatura.

2.4.3 Análise de custos inseridos em atividades de confiabilidade no PCM

Conforme [Marcorin e Lima \(2003\)](#), o setor de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) não deve admitir desvalorização em detrimento do setor encarregado do Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) e da esfera de Planejamento e Controle da Produção (PCP) no que tange a análise dos custos de manejo da empresa. [Dutra \(2019\)](#) concorda ao afirmar que o campo da manutenção deve ser igualmente considerado estratégico para os negócios, promovendo investimentos que dão retorno por meio do aumento dos níveis de confiabilidade e disponibilidade dos ativos, é o que afirma o autor.

[Dutra \(2019\)](#) elucida que uma boa gestão do setor de PCM pode efetivamente aumentar os lucros da empresa. O autor apresenta dois caminhos que podem ser percorridos em vista de aumentar os ganhos, são eles:

- Redução dos custos operacionais
- Aumento da receita

No entanto, o aumento da receita não é algo trivial. [Dutra \(2019\)](#) alega que tal aumento é dependente de vários outros fatores, sobre os quais nem sempre é possível deter um controle efetivo, como por exemplo, o crescimento da demanda, aumento da performance nas vendas e condições de logística. Já os custos operacionais têm uma dependência majoritária de fatores internos á companhia, o que de acordo com o autor, é mais fácil de se gerir e controlar.

Estima-se que os custos relativos a manutenção de uma empresa esteja próximo dos 25%. Dessa forma, o aumento da lucratividade pode se dar por meio da diminuição dos custos operacionais da companhia, como estratégia de um gerenciamento eficaz do setor de PCM. O intuito é caminhar rumo à necessidade de intervir com ações de reparo ou substituição dos componentes cada vez menos, e quando preciso for realizar tal intervenção, fazê-la utilizando de menos recursos. Tal quadro pode ser alcançado por meio da melhoria dos índices de confiabilidade dos equipamentos da linha de manufatura, é o que elucida ([DUTRA, 2019](#)).

Ainda [Dutra \(2019\)](#) apresenta uma classificação para os custos operacionais em duas categorias:

1. Custos diretos
2. Custos indiretos e induzidos

Os custos diretos da manutenção podem ser interpretados como aqueles que são extremamente necessários para o planejamento, programação e execução da manutenção. São exemplos de custos diretos: mão de obra, insumos, ferramentas, locações etc. Já os custos indiretos e induzidos, podem ser encarados como aqueles provenientes do agravamento do efeito das falhas (ver seção 2.1). São exemplos dos custos indiretos e induzidos: lucro cessante, depreciação de ativos, multas por danos ao meio ambiente e encargos por acidentes de trabalho.

Dessa forma, o autor expõe os custos diretos classificando-os como sendo padronizados ou fixos, em detrimento dos custos indiretos e induzidos que são agrupados como sendo variáveis ou relativos. Ainda, [Marcorin e Lima \(2003\)](#) defendem que o gestor de manutenção necessita buscar trabalhar majoritariamente com os custos de ordem direta ao invés dos custos indiretos em ordem de aumentar a lucratividade da empresa.

No entanto, (como apresentado na seção 2.2) embora os custos diretos de manutenção sejam classificados, num primeiro momento, como sendo fixos, quando analisados sob a ótica das diferentes estratégias da manutenção (reativa, preventiva e preditiva), tais custos podem apresentar resultados econômicos amplamente distintos. Esta análise pode ser observada no gráfico da figura 6 que contrasta a Curva de Falha Potencial (apresentada na seção 2.1.4) com a curva de custo relativo a cada estratégia de manutenção.



Figura 6 – Curva de Falha Potencial versus curva de custo para reparo. Fonte: ([DUTRA, 2019](#))

Ao analisar o gráfico (figura 6) é possível concluir que por via de uma análise sistemática do processo de degradação do componente (modelo preditivo da manutenção), a gestão da manutenção apresenta uma maior redução dos custos, ao passo que aguardar pela ocorrência da falha funcional, restringe o plano de ação à estratégia de manutenção reativa. [Dutra \(2019\)](#) afirma que, em média, a manutenção reativa possui um custo de implementação sete vezes maior que o praticado pela manutenção preditiva.

Ainda, o autor afirma que na fase compreendida após o ponto de falha funcional,

o lucro cessante representa, em média, a maior parcela dos custos da aplicação da manutenção reativa (ou corretiva não-programada). Isso é consequência do agravamento do processo de deterioração dos componentes, o que dificulta o seu reparo, além da ocorrência de danos induzidos. Dessa forma, a indisponibilidade dos ativos, interrompe a principal atividade geradora de receita da companhia: a produção. [Smith \(2017\)](#) acrescenta que esse cenário pode ser ainda pior se o arranjo das posições das máquinas na linha de produção estiver configurado numa disposição em série puro. Esse quadro pode levar a parada não apenas de uma máquina, mas de toda a linha de produção.

Já a manutenção corretiva programada pode custar até cinco vezes mais caro que a preditiva. A programação da intervenção possibilita que a parada da máquina possa ser realizada em harmonia com o cronograma de atividades da empresa, impedindo que haja um lucro cessante severo para a companhia. A manutenção preventiva (baseada no tempo), por sua vez, apresenta um custo próximo de três vezes maior que o praticado pela manutenção preditiva (baseado na condição). Isso se deve ao fato do monitoramento constante do processo de degradação da falha (oriundo do modelo preditivo) possibilitar programar a atividade de reparo ou substituição do item para um período em que não haja lucro cessante, é o que elucida ([DUTRA, 2019](#)).

2.5 Um paralelo entre Confiabilidade, Probabilidade e Estatística

Como já apontado nas seções anteriores, o estudo da confiabilidade apresenta-se como uma análise matemática que visa estimar um valor correspondente ao sucesso ou fracasso para uma determinada missão em termos da ausência da falha (ver seção 2.1). Esse procedimento pode ser realizado sob os moldes do estudo da probabilidade, é o que afirma [Leemis \(1995\)](#). Isto significa que o domínio dos valores para todas as confiabilidades deve compreender o intervalo entre 0 (zero) e 1 (um), e que os axiomas da probabilidade podem efetivamente ser aplicados em cálculos de confiabilidade ([MONTGOMERY, 2018](#)).

O estudo da confiabilidade, de igual modo, relaciona-se com o campo da estatística por ser definida como uma função de uma variável aleatória t pertencente ao domínio contínuo que representa um certo período de tempo. Tal variável pode ser representada em diferentes unidades físicas (por exemplo, anos, dias ou horas) e pode até mesmo ser expresso como o número de ciclos ou quilômetros (por fazer menção ao tempo até a falha de um determinado item). Em outros termos, a variável aleatória t , representa o tempo de operação de um componente ou sistema até a manifestação de uma falha funcional (ver seção 2.1.3).

A função de confiabilidade, comumente denominada de $R(t)$, representa a área por debaixo da curva delineada por uma função densidade de probabilidade $f(t)$ (considerando a área por debaixo da curva situada á direita da variável aleatória t). O conceito de

função densidade de probabilidade (f.d.p.), bem como as principais f.d.p.'s utilizadas no estudo de confiabilidade serão apresentadas na seção 2.5.4. A função $R(t)$ também será apresentada na mesma seção, juntamente com outras funções como $F(t)$ e $h(t)$, de igual modo, amplamente utilizadas como medidas fundamentais no estudo de confiabilidade.

Dodson e Schwab (2006) elucidam que quanto maior for o valor do tempo de operação da unidade (t), menor tende a ser o valor da confiabilidade ($R(t)$), de modo que os valores de $R(t)$ tendencialmente diminuem de 1 para 0 à medida que t aumenta. A análise inversa também pode ser empregada: quanto menor for t , maior tende a ser $R(t)$. Isso pode ser visto graficamente por meio da Figura 7.

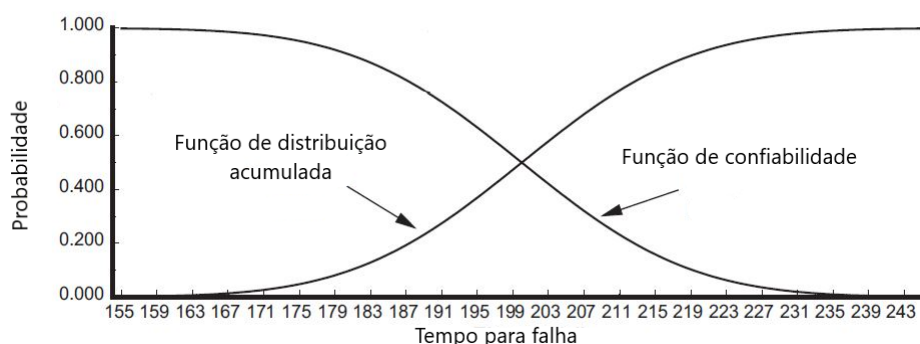


Figura 7 – Curva de interação entre a Função de distribuição acumulada e Função de confiabilidade. Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)

Na seção 2.5.4, serão apresentadas outras medidas de confiabilidade (além da função de $R(t)$) elucidadas por notáveis referências do ramo, a citar os trabalhos de Dodson e Schwab (2006) e Nelson (2009). Não obstante, nesta mesma seção, será exibida uma abordagem de modelagem matemática para cada função salientada.

2.5.1 Axiomas da probabilidade

Nomes como Montgomery (2018) e Pinheiro et al. (2013) propõem uma definição axiomática de probabilidade em termos dos conceitos probabilísticos de Espaço Amostral (Ω), Experimento Aleatório (E), Evento (A) e Probabilidade do Evento ($P(A)$).

Probabilidade trata-se um valor que é associado a cada elemento de uma coleção de eventos (espaço amostral) a partir de um experimento aleatório que atenda as seguintes propriedades:

1. $P(A)$, deve ser um número entre 0 e 1, dessa forma $0 \leq P(A) \leq 1$;
2. $P(\Omega) = 1$
3. Se A e B são eventos mutuamente exclusivos, então $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$

2.5.2 Probabilidade Condicional

Montgomery (2018) também apresenta um cenário para o cálculo da probabilidade de ocorrência de um determinado evento B dado que outro evento A já tenha ocorrido. Para esta condição, dá-se o nome de probabilidade condicional, representado por $P(B|A)$. A formulação matemática para probabilidade condicional é dada pela seguinte expressão:

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \quad (2.1)$$

O autor aponta a parcela contida no numerador da razão na equação 2.1 como eventos independentes entre si. Isto é, a probabilidade de ocorrência do evento A independe da ocorrência de B e vice versa, como elucidado pelas equações 2.2 e 2.3.

$$P(A|B) = P(A) \quad (2.2)$$

$$P(B|A) = P(B) \quad (2.3)$$

Montgomery (2018) também salienta que a probabilidade de ocorrência de vários eventos independentes equivale ao produto de cada probabilidade individual, como mostrado por meio da equação 2.4.

Sejam A e B eventos independentes:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad (2.4)$$

2.5.3 Teorema da Probabilidade Total e Teorema de Bayes

Pinheiro et al. (2013) apresentam uma explanação acerca dos conceitos de Probabilidade Total e Teorema de Bayes em termos do que ele chama de uma "Partição do Espaço Amostral", denotado por Ω .

Segundo o autor, a Partição do Espaço Amostral, é fundamentada com base em três assertivas, para todo i ($i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$) e para todo par (i, j) com $i \neq j$:

1. $P(A_i) > 0$
2. $P(A_i \cap A_j) = 0$
3. $\cup_{i=1}^n A_i = \Omega$

Sendo assim, considerando que B representa um evento qualquer de Ω , é possível então concluir que os eventos $A_1 \cap B, A_2 \cap B, A_3 \cap B, \dots, A_n \cap B$ são caracterizados como

eventos mutuamente excludentes. Ainda o autor conclui que o cálculo de B pode ser dado por $B = \cup_{i=1}^n (A_i \cap B)$, que representa a união de todos os eventos que fazem intersecção com B , como pode ser visto na Figura 8.

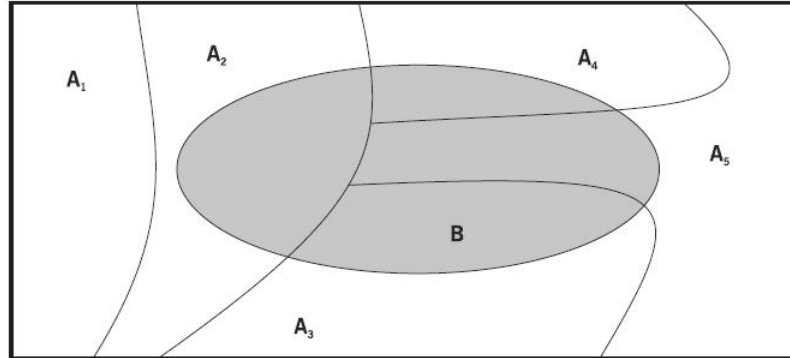


Figura 8 – Partição do Espaço Amostral para $n = 5$. Fonte: (PINHEIRO et al., 2013)

Dessa forma, quando se pretende calcular a probabilidade de ocorrência de um determinado evento $P(B)$ partindo de um conjunto de probabilidades condicionais, as quais envolvem o dito evento, adota-se como procedimento para o cálculo de $P(B)$ o Teorema da Probabilidade Total (MONTGOMERY, 2018).

Sendo assim,

$$P(B) = (A_1 \cap B) + (A_2 \cap B) + (A_3 \cap B) + \dots + (A_n \cap B) \quad (2.5)$$

Logo, pelo Teorema da Probabilidade Total, $P(B)$ é dada por:

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B \setminus A_i)P(A_i) \quad (2.6)$$

O cálculo de $P(B)$ (equação 2.6) representa o que é chamado pelos grandes pesquisadores da área, como Montgomery (2018) e Pinheiro et al. (2013), de "probabilidade a priori". No entanto, existem também as chamadas "probabilidades a posteriori", e os resultados destas podem diferir em muito daqueles obtidos por meio do cálculo da probabilidade a priori, interferindo sobremaneira nos resultados da análise pretendida.

Para ilustrar tal cenário, Pinheiro et al. (2013) expõe o seguinte exemplo: ao considerar uma taxa de falha de 0,05 para o componente da marca A_1 , 0,10 para a marca A_2 e 0,15 para a marca A_3 (levando em conta a ocorrência de falha após 1000 horas de funcionamento), deseja-se conhecer qual seria a probabilidade de um componente (a ser escolhido aleatoriamente) funcionar normalmente por mais de 1000 horas antes de este ser submetido a intervenção de manutenção.

Dessa forma, considerando A_i de modo a representar as possíveis seleções dos componentes das marcas A_1 , A_2 e A_3 e admitindo que 50% dos componentes presentes na empresa são da marca A_1 , 20% são da marca A_2 e 30% são da marca A_3 , tem-se que:

$$P(A_1) = 0,5; P(A_2) = 0,2; P(A_3) = 0,3;$$

Não obstante, assumindo B como sendo o evento de ocorrência da falha antes de 1000 horas, tem-se que:

$$P(B \setminus A_1) = 0,05; P(B \setminus A_2) = 0,10; P(B \setminus A_3) = 0,15;$$

Logo, aplicando-se a equação 2.6 é possível realizar o cálculo da probabilidade (a priori) $P(B)$, para a falha antes de 1000 horas do componente que fora escolhido aleatoriamente:

$$P(B) = 0,09 = 9\%$$

Todavia, as probabilidades $P(A_i)$ (assumidas para selecionar os componentes $A(i)$) podem ser diferentes considerando o cenário no qual se tem o conhecimento prévio se estes falharam ou não. Nesse sentido, o cálculo admitindo as probabilidades condicionais $P(A_1 \setminus B)$, $P(A_2 \setminus B)$ e $P(A_3 \setminus B)$ é considerado pelo autor como uma análise da probabilidade a posteriori, e lê-se como a probabilidade do componente A_i ($i = 1, 2$ e 3) ser escolhido, haja visto que o mesmo já apresentou falha antes de 1000 horas de funcionamento.

Dessa forma, implementando-se combinadamente as equações de Probabilidade Condicional e o Teorema da Probabilidade Total (equações 2.1, 2.3 e 2.4) obtêm-se a seguinte expressão:

$$P(A_i \setminus B) = \frac{A_i \cap B}{P(B)} = \frac{P(B \setminus A_i)P(A_i)}{P(B)} \quad (2.7)$$

Sendo assim, assumindo $P(B) = 0,09$, têm-se que:

$$P(A_1 \setminus B) \cong 0,28$$

$$P(A_2 \setminus B) \cong 0,22$$

$$P(A_3 \setminus B) \cong 0,50$$

É possível comparar os resultados obtidos acerca das probabilidades de seleção dos componentes A_i por meio da tabela 1:

Portanto, o simples fato de se ter o conhecimento prévio a respeito da probabilidade $P(B)$ associada a duração do componente selecionado (considerando o mesmo exemplo), possibilita alterar-se por completo as probabilidades de seleção dos componentes $P(A_i)$.

Tabela 1 – Comparação das probabilidades a priori e posteriori. Fonte: Adaptado de Pinheiro et al. (2013)

Marca	A priori	A posteriori
A_1	0,50	0,28
A_2	0,20	0,22
A_3	0,30	0,50

Pinheiro et al. (2013) afirmam que a generalização desse cenário leva a exposição do Teorema de Bayes (exibido por meio da equação 2.7), que pode ser expresso em função da Probabilidade Condicional. Não obstante, o denominador da razão (ainda na equação 2.7) denotado por $P(B)$, é calculado por meio do Teorema da Probabilidade Total.

2.5.4 O Teorema de Bayes e as principais medidas de confiabilidade

Utilizando-se do Teorema de Bayes, é possível introduzir uma expressão matemática que concatena as principais medidas de confiabilidade. Dodson e Schwab (2006) apresentam tais funções como sendo:

- Função densidade de probabilidade, representada por $f(t)$;
- Função de confiabilidade, representada por $R(t)$;
- Função de distribuição acumulada ou complemento de $R(t)$, representada por $F(t)$;
- Função de *Hazard* ou Função de risco, representada por $h(t)$;
- Tempo médio para a falha (para itens não reparáveis);
- Tempo médio entre falhas (para itens reparáveis)

Assim sendo, as funções $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$ podem ser correlacionadas por meio dos fundamentos de probabilidade a priori e posteriori, intrínsecas ao Teorema de Bayes. O resultado dessa relação é exibido por meio da equação 2.8.

Ao tomar $h(t)$ expressando $f(t)$ sob uma análise a posteriori da variável aleatória t , têm-se que:

$$f(t)_{a\ posteriori} = \frac{f(t)_{a\ priori}}{R(t)} \quad (2.8)$$

Por conseguinte, visando um correto entendimento a respeito da equação 2.8, faz-se necessário discorrer mais profundamente acerca da concepção e aplicação de tais medidas de confiabilidade.

2.5.5 Função densidade de probabilidade

Dodson e Schwab (2006) apresentam a $f(t)$ como uma função que caracteriza o comportamento de uma variável aleatória (*v.a.*). No que lhe diz respeito, uma *v.a.* pode ser classificada como discreta ou contínua. O presente trabalho pretende adotar como escopo de atuação o plano de análise da variável aleatória t distribuída continuamente, representando o tempo percorrido por um componente ou sistema até a ocorrência de uma falha funcional (também chamada de TTF, tempo para falha, em português).

A função densidade de probabilidade também descreve o formato da distribuição de probabilidades, e representa todo o espaço amostral (Ω). Isto é, a soma da área de baixo da curva de $f(t)$, deve ser igual a 1. Não obstante, os valores da *v.a.* devem admitir apenas valores positivos, é o que acrescentam Fogliato e Ribeiro (2009). Utilizando uma distribuição normal como ilustração, a função densidade de probabilidade (para esta distribuição) é mostrada por meio da Figura 9, onde a variável aleatória *length* representa o comprimento de um determinado item relacionado as distribuições de probabilidade da amostra.

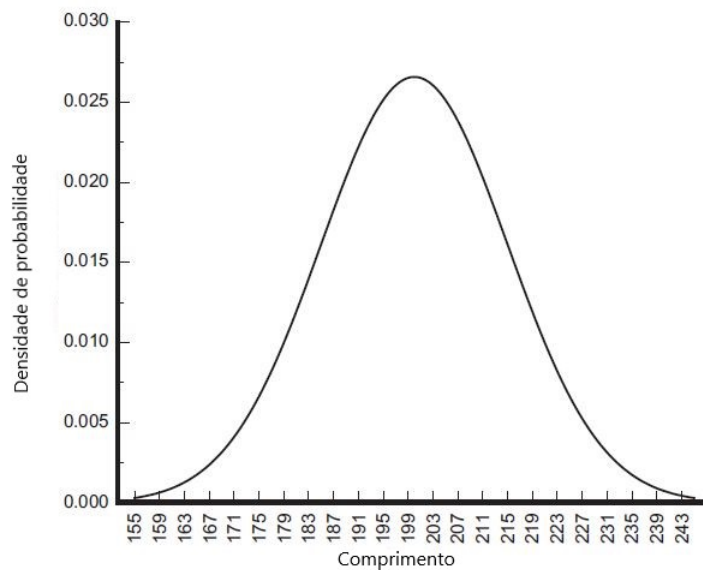


Figura 9 – Exemplo de Função densidade de probabilidade, considerando uma distribuição normal. Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)

No domínio contínuo, a função densidade de probabilidade é exibida por meio da equação 2.9.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (2.9)$$

2.5.6 Função de distribuição acumulada

Dodson e Schwab (2006) elucidam a função de distribuição acumulada $F(t)$ ao referirem à área por debaixo da curva (isto é, por debaixo da função densidade de probabilidade ($f(t)$), situada necessariamente á esquerda da t . Adotando uma distribuição normal como meio de ilustração da função de distribuição acumulada ou $F(t)$, têm-se a Figura 10.

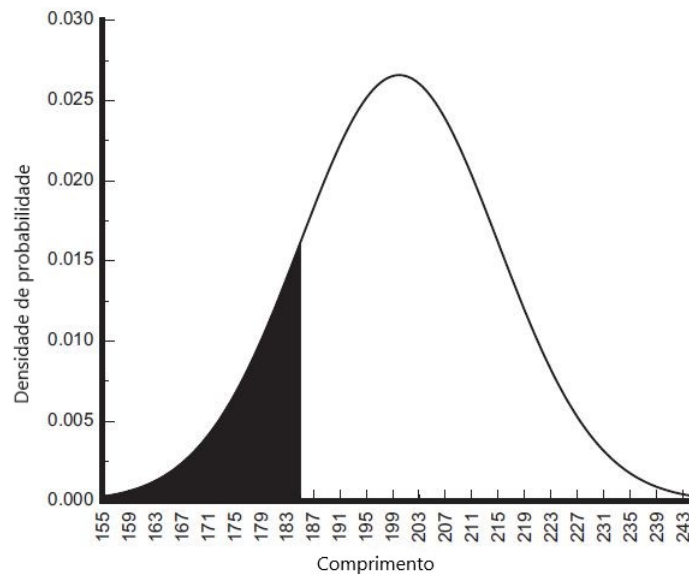


Figura 10 – Exemplo de função de distribuição acumulada, considerando uma distribuição normal. Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)

Fogliato e Ribeiro (2009) acrescentam que $F(t)$ tem por intento representar a probabilidade de falha da unidade numa missão de duração T , necessariamente menor ou igual a t , e pode ser representada ao alterar-se os limites de integração da equação 2.9, resultando na equação 2.10.

$$P(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt \quad (2.10)$$

Fogliato e Ribeiro (2009) também realiza uma abordagem entre a função densidade de probabilidade e a função de distribuição acumulada utilizando-se do cálculo da derivada e da sua definição de limite (equação 2.11):

$$f(t) = F'(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (2.11)$$

2.5.7 Função de confiabilidade

A função de confiabilidade é dita como complemento de $F(t)$. Isto é, uma vez que a função de distribuição acumulada traduz a probabilidade de falha da unidade, a função de confiabilidade, por sua vez, retrata a probabilidade de sua sobrevivência (DODSON; SCHWAB, 2006).

Nesse mesmo sentido, $F(t)$ e $R(t)$ podem relacionar-se entre si como sendo uma o complemento da outra, como mostra a equação 2.12.

$$P(T > t) = R(t) = 1 - F(t) \quad (2.12)$$

Ao associar as equações 2.10 e 2.12, $R(t)$ pode ser expressa como:

$$R(t) = 1 - \int_{-\infty}^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (2.13)$$

A função de confiabilidade $R(t)$ pode ser exibida como mostra a Figura 11, adotando também uma distribuição Gauss (normal) para exemplificar.

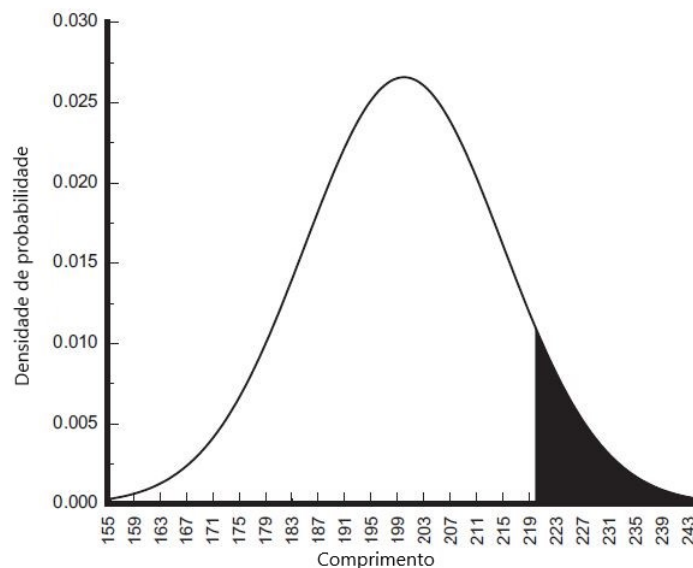


Figura 11 – Exemplo de função de confiabilidade, considerando uma distribuição normal.
Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)

2.5.8 Função de Hazard

Como já introduzido por meio da equação 2.8, $h(t)$ é uma medida de confiabilidade que expressa a taxa de risco, atendo-se ao intervalo (situado a posteriori de t) entre t e Δt em vista de se calcular a probabilidade de ocorrência da falha, é o que elucidam Fogliato e Ribeiro (2009). Isto posto, Dodson e Schwab (2006) também afirmam que quanto maior for o valor de $h(t)$ maior é a probabilidade de ocorrência do evento da falha repentina.

Considerando o intervalo entre t e $t + \Delta t$ e considerando T como a duração de uma determinada missão, a probabilidade de falha pode ser dada como:

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} f(t)dt \quad (2.14)$$

Ao usar os fundamentos da Probabilidade Condicional (ver equação 2.1), a probabilidade de falha no intervalo considerado pode ser exposta como:

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t \mid T \geq t) = \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t)}{P(T \geq t)} \quad (2.15)$$

Ao admitir que a área compreendida pelo cálculo da integral da equação 2.14 equivale a área de $R(t) - R(t + \Delta t)$, é possível afirmar, de igual modo, que:

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t \mid T \geq t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (2.16)$$

Isto posto, [Dodson e Schwab \(2006\)](#) e [Fogliato e Ribeiro \(2009\)](#) concordam entre si ao evidenciar a função de risco tal como uma taxa de falha instantânea, tomando o intervalo temporal compreendido por $\Delta t - t$ como sendo um espaço de tempo infinitesimal.

Dessa forma, é possível expressar o cálculo de concepção de $h(t)$ em termos da definição de limite para derivada, tomando $\Delta t \rightarrow 0$, como elucida a equação 2.17.

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} \quad (2.17)$$

Admitindo que $F'(t) = f(t)$ (equação 2.11) e assumindo também que $F(t) + R(t) = 1$, então:

$$f(t) = \frac{d(1 - R(t))}{dt} = -R'(t) \quad (2.18)$$

Logo, a equação 2.17 pode ser evidenciada por meio do Teorema de Bayes (ver seção 2.5.3) como:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.19)$$

2.5.9 Curva da banheira

O formato de $h(t)$ pode comunicar a maneira como o item de análise envelhece, é o que afirmam [Fogliato e Ribeiro \(2009\)](#). Desta forma, vários padrões de falhas já encontram-se convencionados por pesquisadores do ramo de confiabilidade em vista de facilitar a análise do comportamento da falha de certos equipamentos e sistemas de engenharia,

padrões como: curva de desgaste tradicional, falha aleatória, curva de aumento inicial com desaceleração, dentre outras. Para um estudo mais detalhado sobre os padrões de falha, recomenda-se o texto de Dutra (2019).

Nesse sentido, Fogliato e Ribeiro (2009) apresentam três classificações gerais que elucidam, de modo geral, o comportamento da função de risco em termos do tempo de operação do item. Tais classificações são:

- Função de risco decrescente (FRD);
- Função de risco estacionária (FRE);
- Função de risco crescente (FRC);

Ainda, os autores afirmam que produtos manufaturados geralmente apresentam estas três especificações do aspecto comportamental da falha de modo consecutivo. Esse modelo genérico pode ser mostrado por meio de um gráfico que contrasta num plano cartesiano o fator de risco da falha em detrimento do tempo de operação do item, conhecido como curva da banheira, mostrada pela Figura 12.

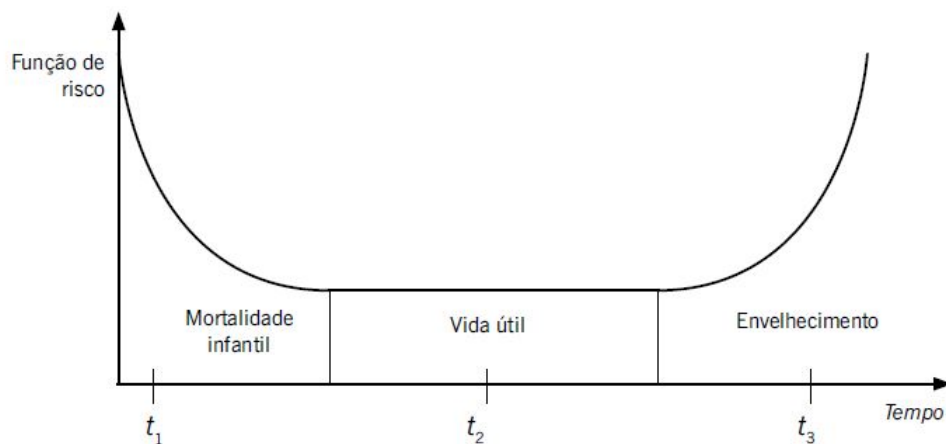


Figura 12 – Curva da banheira. Fonte: (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009)

Como mostrado no gráfico, as três fases gerais da vida de um item especificadas por t_1 , t_2 e t_3 podem relacionar-se, respectivamente, com os comportamentos de falha classificados como função de risco decrescente (FRD), função de risco estacionária (FRE) e função de risco crescente (FRC). Fogliato e Ribeiro (2009) afirmam ainda que, defeitos inerentes ao Planejamento e Controle da Produção (PCP) podem ocasionar falhas precoces no que tange a atuação do produto, fase esta denominada de período de mortalidade infantil, compreendida no gráfico por t_1 .

Ainda, os autores expõem que o evento da falha funcional no período compreendido por t_2 pode fazer menção a condições severas de operação do item ou mesmo a condições

extremas do ambiente no qual este se encontra inserido. Tal período é considerado como a fase de vida útil do item, sendo que as falhas que manifestam-se nesse período apresentam caráter aleatório, podendo ocorrer em qualquer momento desta etapa, isto é, o risco de falha é constante nesse período.

Já a fase pertinente a etapa t_3 representa o período de degradação do item ou o seu envelhecimento. Dutra (2019) propõe uma análise de tal período sob o ponto de vista do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) e expõe que, por consequência desta deterioração, faz-se necessário investir-se em procedimentos de investigação da condição (ou estado) de degradação do item, que possibilitem prever o momento aproximado da falha funcional. Tais estratégias podem incluir: ensaios de vibração, termografia, análise de óleo, dentre outras estratégias concernentes ao modelo preditivo da manutenção (ver seção 2.2.3).

2.5.10 As principais distribuições de probabilidade para o domínio contínuo

Notáveis referências do ramo da confiabilidade como Nelson (2009) e Dodson e Schwab (2006) apresentam as principais funções densidade de probabilidade utilizadas para descrever conjuntos de dados pertencentes a classe das variáveis aleatórias contínuas, sendo elas:

- Distribuição de *Weibull*
- Distribuição exponencial
- Distribuição normal ou Gaussiana

Informações sobre sobre as principais distribuições de probabilidades utilizadas no domínio discreto fogem do escopo deste trabalho, todavia, para imersão neste assunto, é sugerido o trabalho de Dodson e Schwab (2006). Ainda, o presente trabalho se propõe a restringir-se à análise das distribuições de *Weibull*, exponencial e normal, pelo fato destas apresentarem grande aplicabilidade na modelagem de variáveis aleatórias de tempo para falha (TTF, em inglês, *Time to Fail*).

Isto posto, um destaque será atribuído à distribuição de *Weibull* tendo em vista a sua utilização mais à frente na modelagem da confiabilidade a ser realizada para o estudo de caso, apresentado na seção 5.1.1.

2.5.11 Distribuição de *Weibull*

Dodson e Schwab (2006) sustentam que a distribuição de *Weibull* destaca-se por ser a distribuição mais utilizada nas modelagens de confiabilidade para tempo para falha. Nelson (2009) corrobora o argumento de Dodson e Schwab (2006) ao elucidar que a

distribuição *Weibull* é notável por sua flexibilidade, podendo ajustar-se á vários outros modelos de distribuição à medida que seus parâmetros de identidade se alteram.

A distribuição de *Weibull* é bastante aplicável nos mais diversos ramos da engenharia. Nelson (2009) aponta que sua aplicação pode se dar no contexto de equipamentos mecânicos rotativos (tais como rolamentos e eixos), componentes eletrônicos e ainda na implementação de testes acelerados.

A função densidade de probabilidade de *Weibull* pode ser dada pela expressão matemática como pela Figura 2.20:

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t - \delta}{\theta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^\beta} \quad (2.20)$$

onde

- β é o parâmetro de forma
- θ é o parâmetro de escala
- δ é o parâmetro de localização
- t é o tempo de operação do item, admitindo $t \geq \delta$

O parâmetro de forma confere à distribuição flexibilidade. isto é, na medida em que β é alterado, o formato da função também é modificado, é o que expõe Montgomery (2018). Ainda, Dodson e Schwab (2006) juntamente com Montgomery (2018) expõem que para $\beta = 1$, a distribuição de *Weibull* se assemelha a distribuição exponencial. Para $\beta = 2$, a distribuição de *Hayleigh* pode ser replicada. Na mesma direção, para β entre 3 e 4, o formato da distribuição Normal pode ser simulado. Ainda, para valores maiores que 4, a distribuição Lognormal passa a ser reproduzida. Na figura 13, é possível ver os vários formatos da distribuição de *Weibull* como resultado de alterar o valor de β .

Não obstante, o parâmetro de escala (θ) também tem sua importância na análise do conjunto dos dados que acompanham o formato da distribuição, expõe Nelson (2009). Também conhecido como vida característica, o parâmetro de escala pode ser interpretado como uma medida de desvio padrão da distribuição, isto é, o quão os dados estão dispersos em torno de um valor central, elucida o autor. Na figura 14, é possível verificar a alteração do nível de achatamento da distribuição à medida em que o valor de θ aumenta.

Dodson e Schwab (2006) elucidam que o parâmetro de localização, por sua vez, é utilizado em vista de definir-se uma zona livre de falhas para o item de análise, deslocando a função na direção do eixo das abscissas que expressa o tempo de funcionamento do item. Isto é, quando $\delta > 0$ pode significar, por exemplo, o período de tempo em que a unidade

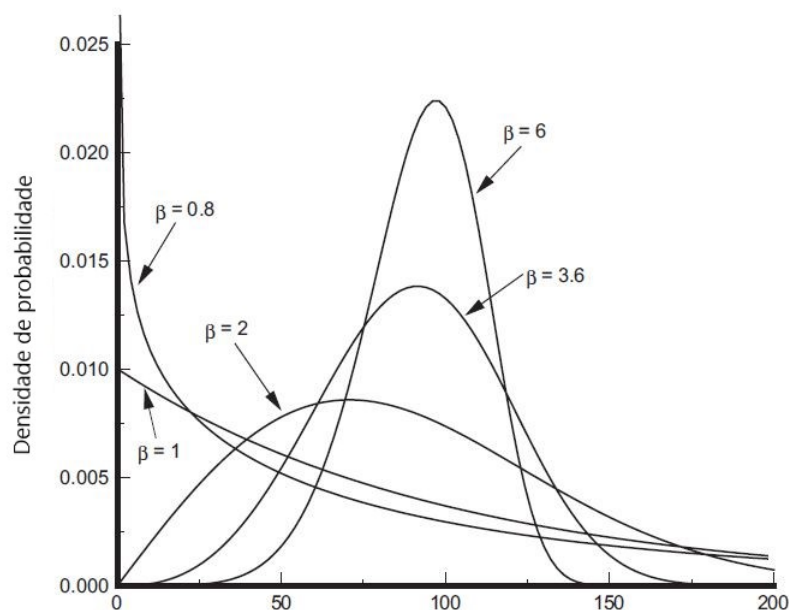


Figura 13 – Efeito da variação do parâmetro de forma para distribuições de *Weibull*, considerando $\theta = 100$ e $\delta = 0$. Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)

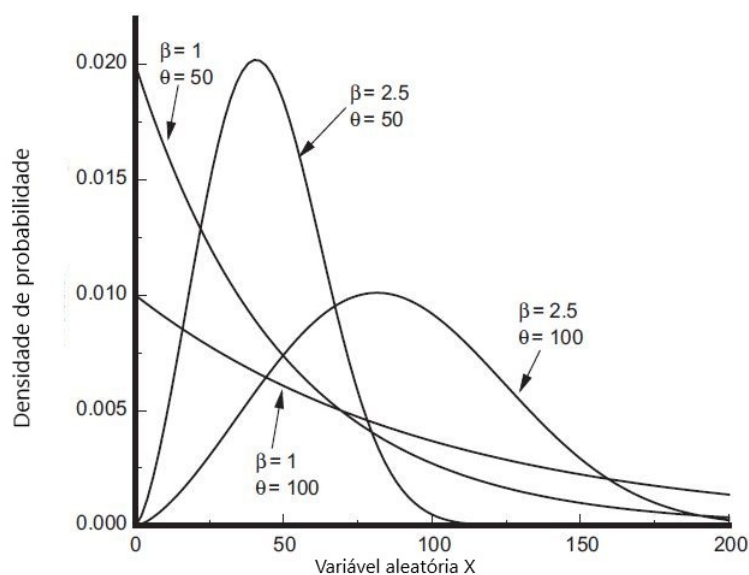


Figura 14 – Efeito da variação do parâmetro de escala para distribuições de *Weibull*. Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)

esteve estocada conforme recomendações do fabricante, estando neste período isenta da possibilidade de apresentar falha.

Quando $\delta < 0$ é um indicativo de que o item já foi acometido por falha antes mesmo de vir a funcionar pela primeira vez. O autor expõe que tal cenário pode representar, por exemplo, unidades que apresentaram falhas de manufatura as quais passaram despercebidas e que foram entregues aos clientes, ou mesmo falhas que ocorreram durante o transporte do produto. Para as modelagens das distribuições, é comum considerar $\delta = 0$,

afirmam [Dodson e Schwab \(2006\)](#). Na figura 15, é possível ver o efeito da alteração do valor de δ .

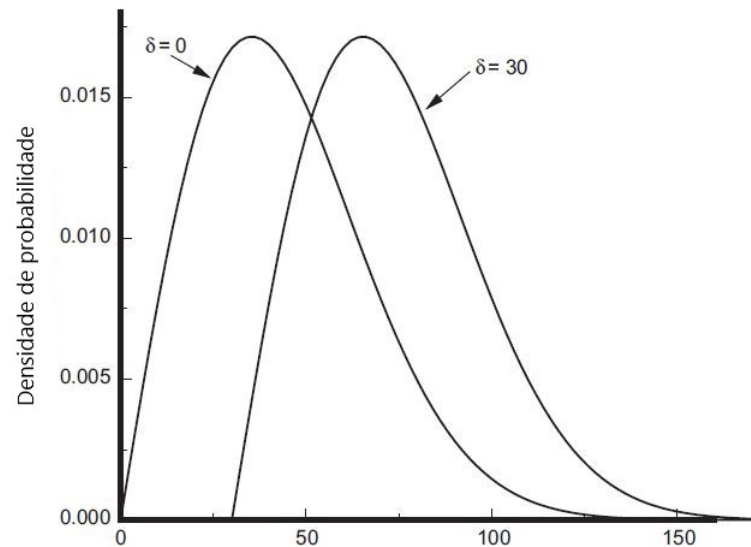


Figura 15 – Efeito da variação do parâmetro de localização para a distribuição de *Weibull*.
Fonte: ([DODSON; SCHWAB, 2006](#))

Como mostrado pela equação 2.19, a distribuição de *Weibull*, denotada na equação por $f(t)$, é definida como o produto entre a função de confiabilidade $R(t)$ e a função de risco $h(t)$ da distribuição. Assim sendo, a taxa instantânea de falha pertinente a distribuição de *Weibull* pode ser expressa como mostra a equação 2.21:

$$h(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t - \delta}{\theta} \right)^{\beta-1} \quad (2.21)$$

Outrossim, a função de confiabilidade da distribuição de *Weibull* pode ser expressa como:

$$R(t) = e^{-\left[\frac{t-\delta}{\theta}\right]^\beta} \quad (2.22)$$

Como é possível perceber na equação de $h(t)$ de *Weibull*, a função de risco é determinada pelo parâmetro de forma (β) da distribuição, sendo possível fazer uma correlação com a curva da banheira (ver seção 2.5.9) em termos das classificações do comportamento de $h(t)$. Isto é, para valores de $\beta < 1$, a função de risco se torna decrescente (FRD), fazendo menção ao período de mortalidade infantil da vida do produto. Para valores de $\beta = 1$ a função de risco apresenta comportamento estacionário ou constante (FRE), relacionando-se ao período de vida útil do item. Para valores de $\beta > 1$, a função $h(t)$ assemelha-se a uma FRC, representando o estágio de envelhecimento do item.

A alteração do comportamento da função de risco em termos da mudança do valor de β pode ser visto na Figura 16.

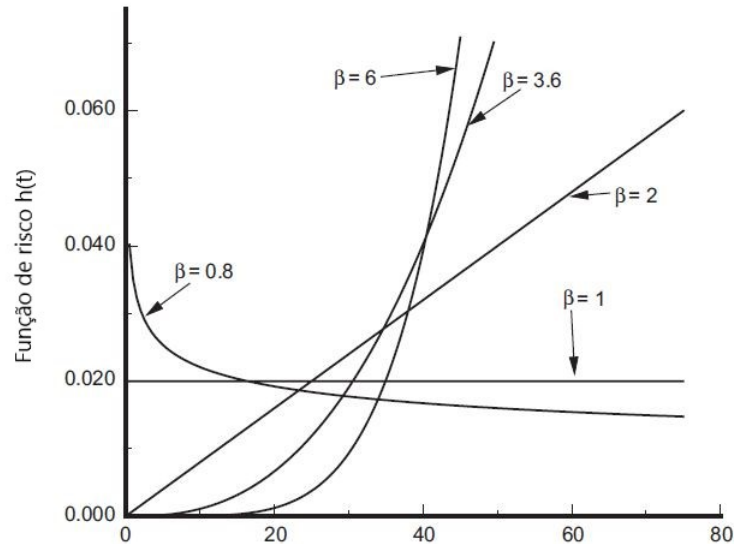


Figura 16 – Função de risco da distribuição de *Weibull* Fonte: (DODSON; SCHWAB, 2006)

A média da função densidade de probabilidade de *Weibull* é apresentada por Dodson e Schwab (2006) utilizando-se da distribuição Gama para o valor de Γ da equação 2.23. Admitindo trabalhar-se com a variável aleatória tempo para falha, a média é comumente representada por MTTF, traduzido para o português como o tempo médio até a ocorrência da falha funcional e utilizado para itens não reparáveis. A média também pode ser designada de MTBF, tempo médio entre falhas, em português, termo utilizado para itens reparáveis (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009).

$$\mu = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.23)$$

A variância da distribuição de *Weibull*, por sua vez, é representado por:

$$\sigma^2 = \theta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] \quad (2.24)$$

2.5.12 Distribuição exponencial

Dodson e Schwab (2006) e Nelson (2009) afirmam que a distribuição exponencial é comumente utilizada na análise de confiabilidade de componentes eletrônicos. Isso se dá por consequência do comportamento constante da função de risco $h(t)$ da distribuição. Montgomery (2018) acrescenta que, a razão pela qual a taxa de falha de componentes

eletrônicos apresenta-se como sendo constante, pode ser justificado por conta de tais falhas serem causadas por interferências denominadas pelo autor como "externas" ao sistema.

A função densidade de probabilidade exponencial por ser expressa como elucida a equação 2.25.

Admitindo $t > 0$ e que λ é a taxa de falha:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.25)$$

onde,

$$h(t) = \lambda = \frac{1}{\theta} \quad (2.26)$$

O valor médio da distribuição exponencial é representado por θ e pode ser calculado como:

$$\theta = \frac{1}{\lambda} \quad (2.27)$$

Não obstante, a variância da função exponencial pode ser dada por:

$$\sigma^2 = \theta^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.28)$$

2.5.13 Distribuição normal ou Gaussiana

A distribuição normal é apresentada por [Montgomery \(2018\)](#) como sendo uma das ferramentas mais utilizada para estruturar uma distribuição de uma variável aleatória (*v.a.*). [Dodson e Schwab \(2006\)](#) corroboram ao afirmar que sua popularidade deve-se ao fato de existir uma grande tendência de que um determinado resultado de uma média ou de uma soma de uma quantidade n de *v.a.'s* independentes venha a tornar-se, à medida que n aumenta, uma distribuição do tipo normal.

Para tal tendência, há um teorema próprio, formulado primeiramente pelo matemático De Moivre em 1733 e posteriormente concluído por Gauss, denominado de Teorema do Limite Central ([MONTGOMERY, 2018](#)).

A função densidade de probabilidade normal é exibida por meio da equação 2.29.

Admitindo que $-\infty < t < \infty$:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\Pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.29)$$

Ainda, [Montgomery \(2018\)](#) elucida que a distribuição normal é caracterizada por apresentar visualmente um formato de sino com configuração simétrica, diferenciando-

se uma das outras por meio da medida do valor central (também chamada de média e denotado por μ ,) além do tamanho da dispersão dos resultados, podendo tal dispersão também ser citada como desvio padrão (σ) ou variância da função (σ^2).

O autor ainda expõe que, por conta de 99,73% dos resultados da *v.a.* estarem contidos no intervalo entre $\mu - 3\sigma$ e $\mu + 3\sigma$, a largura de uma distribuição normal é, usualmente, dita como sendo de 6σ , fazendo menção ao modelo *Seis Sigma* de controle de processos da manufatura. Tal cenário pode ser ilustrado por meio da Figura 17, onde x representa a variável aleatória da distribuição normal.

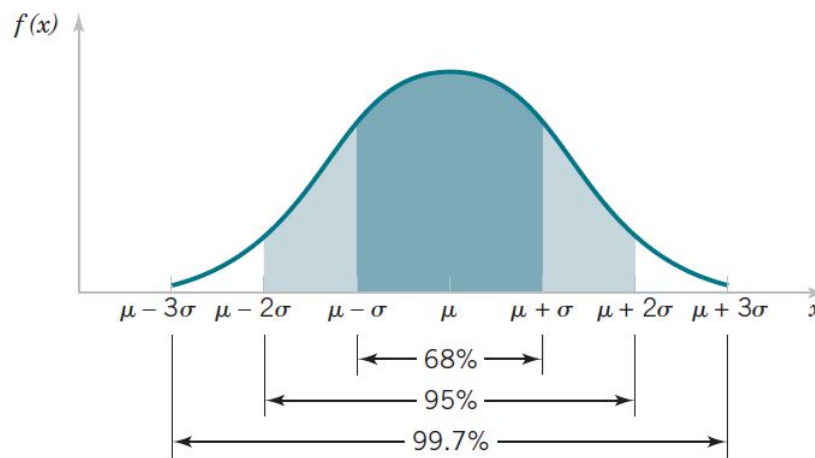


Figura 17 – Distribuição de Gauss. Fonte: (MONTGOMERY, 2018)

Dodson e Schwab (2006) afirmam que a função densidade de probabilidade normal não pode ser integrada de modo implícito. Montgomery (2018) acrescenta que a comprovação de que a área correspondente ao espaço sob a curva da distribuição equivale a 1, necessita de métodos de integração avançada. Assim sendo, em vista de facilitar a implementação da distribuição Gaussiana, é possível efetuar-se uma transformação de uma *v.a.* ordinária para uma *v.a.* normal padronizada, denotada por Z .

A distribuição de Gauss padronizada é caracterizada por possuir $\mu = 0$ e $\sigma^2 = 1$. Uma *v.a.* do tipo Z utiliza-se de valores de probabilidades tabelados para uma variável aleatória normal padrão. A padronização de uma *v.a.* normal pode ser efetivada por meio da equação 2.30:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2.30)$$

2.5.14 Estimativa de parâmetros

Como abordado na seção 2.5.4, a engenharia de confiabilidade apresenta algumas medidas a partir das quais é possível realizar modelagens de probabilidade para sobrevi-

vência ($R(t)$), para a falha ($F(t)$) e para a tendência de falha instantânea ($h(t)$) de uma unidade.

Dependendo de qual tipo de conjunto de dados se trabalha, há uma função densidade de probabilidade $f(t)$ específica que melhor se ajusta a ocasião. Em suma, duas alternativas são comumente utilizadas em vista de verificar-se o quão ajustável um conjunto de dados é para uma determinada distribuição, são elas: alternativa gráfica e testes de aderência. Todavia, tal tópico não faz parte do escopo do presente trabalho, sendo recomendados os textos de Fogliato e Ribeiro (2009) e Birolini (2017) para imersão e aprofundamento no assunto.

Em vista de realizar-se análises sobre os resultados obtidos a partir da distribuição de probabilidade, Blischke e Murthy (2011) afirmam ser necessário primeiramente estimar os parâmetros que identificam e distinguem uma função densidade de probabilidade de outra, utilizando-se de técnicas da estatística inferencial. Tais técnicas se traduzem fundamentalmente em três métodos:

- Máxima Verossimilhança
- *Hazard Plotting* ou Gráfico de Risco
- *Probability Plotting* ou Gráfico de Probabilidade

No entanto, o presente trabalho se propõe a implantar como escopo de estudo a implementação do método da máxima verossimilhança, por esta apresentar-se como uma modelagem matemática mais rigorosa e robusta, traduzindo-se numa ferramenta que possibilita alcançar maior acurácia para os resultados quando comparado com os métodos do Gráfico de Risco e Gráfico de Probabilidade.

2.5.15 Estimativa da Máxima Verossimilhança

O método da máxima verossimilhança é apresentado por Dodson e Schwab (2006) como sendo o método de geração de estimadores de maior acurácia e, por isso, é o mais utilizado.

O autor expõe a função de verossimilhança, denotada por L , como é exibida pela equação 2.31. Admitindo $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ como sendo variáveis aleatórias independentes que seguem uma função densidade de probabilidade (função de um único parâmetro da distribuição θ) $f(t, \theta)$, então:

$$L(t_1, t_2, t_3, \dots, t_n; \theta) = f(t_1, \theta)f(t_2, \theta)f(t_3, \theta)\dots f(t_n, \theta) \quad (2.31)$$

Isto posto, a função da máxima verossimilhança pode ser obtida ao maximizar-se a função de verossimilhança L . Dessa forma, é aplicada a derivada total em L , sendo o resultado desta igualado a zero. Esse procedimento é singular para cada função densidade de probabilidade $f(t)$ (DODSON; SCHWAB, 2006).

O presente trabalho propõe-se em estudar os métodos da máxima verossimilhança aplicado a distribuição de *Weibull* e a distribuição exponencial, por se tratarem de funções amplamente utilizadas na modelagem de *MTTF* (tempo médio para falha, em português) para itens não reparáveis e *MTBF* (tempo médio entre falhas, em português) para itens reparáveis.

2.5.16 Estimativa da Máxima Verossimilhança para a distribuição exponencial

Dodson e Schwab (2006) apresentam o método de estimativa do único parâmetro de identificação da distribuição exponencial através do método da máxima verossimilhança, destacando ser este o caminho mais fácil a ser percorrido em vista de realizar tal aferição. Esta facilidade justifica-se pelo fato de ser necessário realizar o cálculo da derivada da equação de verossimilhança denotada por L uma única vez (por motivo de existir apenas uma única variável de interesse).

Sendo a função densidade de probabilidade exponencial identificada como ilustra a equação 2.25, o parâmetro de interesse para a realização da estimativa é θ . Nesta direção, Dodson e Schwab (2006) exibem a estimativa do único parâmetro da função, como sendo:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{r} \quad (2.32)$$

onde x_i representa os dados de falha coletados, n retrata a quantidade de dados adquiridos e r relaciona-se com o número de ocorrência de falhas.

Ainda, os autores apresentam uma relação entre a média θ da função exponencial com a taxa de falha da distribuição (denotada por λ), referindo-se tal medida a função de risco $h(t)$ da distribuição, que, por sua vez, apresenta-se como constante. A equação 2.33 elucida tal conexão.

$$\lambda = \frac{1}{\theta} \quad (2.33)$$

Fogliato e Ribeiro (2009) e Nelson (2009) também apresentam a média θ da função (ao trabalhar-se com a *v.a.* tempo para falha) equivalendo a medida de *MTTF* para itens não reparáveis ou *MTBF* para itens reparáveis.

Ainda Dodson e Schwab (2006) apresenta um intervalo de confiança ou erro associado para o resultado da análise de confiabilidade $R(t)$ que fora estimado. Tal intervalo

pode ser exibido em termos da função qui-quadrado tendo em vista dois cenários de realização da análise: censura à direita e censura à esquerda.

Fogliato e Ribeiro (2009) elucidam que a censura à direita (também chamada de censura de tempo) considera um intervalo truncado de tempo em vista de realizar-se um teste de falha considerando uma amostra aleatória de unidades, tentando por levantar-se dados de tempo para falha (*TTF*), que a posteriori, serão implementados na análise de estimativa de parâmetros. Por sua vez, a censura à esquerda tem em vista truncar a quantidade de unidades falhantes submetidas ao teste de falha. Nelson (2009) acrescenta que a decisão de qual modelo de censura será utilizado está ligado às condições financeiras de contorno que permeiam o cenário de realização do ensaio.

Assim sendo, a confiança para o parâmetro θ da função exponencial para uma modelagem de teste com censura à direita pode ser representada pela equação 2.34:

$$\frac{2 \sum_{i=1}^n x_i}{\chi^2(\frac{\alpha}{2}, 2r + 2)} \leq \theta \leq \frac{2 \sum_{i=1}^n x_i}{\chi^2(1 - \frac{\alpha}{2}, 2r)} \quad (2.34)$$

A equação da confiança para o resultado de θ considerando a utilização da censura à esquerda, pode ser dada por:

$$\frac{2 \sum_{i=1}^n x_i}{\chi^2(\frac{\alpha}{2}, 2r)} \leq \theta \leq \frac{2 \sum_{i=1}^n x_i}{\chi^2(1 - \frac{\alpha}{2}, 2r)} \quad (2.35)$$

2.5.17 Estimativa da Máxima Verossimilhança para a distribuição de *Weibull*

Como apresentado na seção 2.5.11, a função densidade de probabilidade de *Weibull* é identificada por três parâmetros: parâmetro de forma, parâmetro de escala e parâmetro de localização. Assim sendo, diferentemente da análise da máxima verossimilhança realizada para a distribuição exponencial, a estimativa dos parâmetros da distribuição de *Weibull* apresenta-se menos categoricamente.

Nelson (2009) e Dodson e Schwab (2006) exploram essencialmente apenas dois dos parâmetros da função em vista de reduzir o trabalho da maximização da equação da verossimilhança L , fazendo-se necessário aplicar métodos numéricos iterativos em vista calcular-se os pontos críticos de L em função das duas variáveis β e θ da função.

A função da máxima verossimilhança para a distribuição de *Weibull* é dada por:

$$\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln x_i = \left[\sum_{i=1}^n x_i^\beta \right] \left[\sum_{i=1}^n x_i^\beta \right]^{-1} - \frac{1}{\beta} \quad (2.36)$$

$$\theta = \left[\frac{1}{r} \sum_{i=1}^n x_i^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.37)$$

onde r representa o número de falhas e n o número total de dados (censurados e não censurados).

3 METODOLOGIA

A finalidade deste trabalho consiste em estimar matematicamente um intervalo otimizado para a realização de intervenção de manutenção sobre um componente industrial que possui um fator de deterioração proporcional à sua taxa de envelhecimento. A estimativa será feita considerando uma análise de confiabilidade do componente estudado.

Para tanto, o presente trabalho propõe-se a implementar a metodologia DMAIC como uma sistematização a ser seguida para execução de um estudo de caso. Esta metodologia segue etapas de aplicação de caráter genérico, portanto podem ser aplicadas a componentes variados, e serão apresentadas em detalhes na sequência.

3.1 DMAIC

Scatolin et al. (2005) apresentam que, originalmente oriundo do modelo *Seis Sigma*, o DMAIC é uma ferramenta que objetiva identificar, mensurar e minimizar as fontes de variação de um processo. Em outras palavras, num contexto industrial, o modelo Seis Sigma propõe o aperfeiçoamento dos processos de manufatura da corporação estabelecendo uma estreita relação entre técnicas estatísticas com as ferramentas de qualidade, percorrendo uma trajetória lógica por meio das etapas do DMAIC. Por meio da aplicação do método do DMAIC, incontáveis ganhos podem ser obtidos, tanto em termos de qualidade de manufaturados quanto em termos de custo de produção (SHANKAR, 2009).

Ainda, nesse mesmo sentido, Fogliato e Ribeiro (2009) propõe que a qualidade de manufatura e confiabilidade são temas que estão interligados. O autor ainda salienta que os procedimentos de manutenção devem ser tratados como determinantes para um resultado eficiente da produção dentro de uma corporação. Logo, pode-se afirmar que as etapas do DMAIC podem ser aplicados de forma oportuna na estruturação de uma análise de confiabilidade de um componente, bem como na apresentação de um plano de manutenção para este. Ainda, autores como Pyzdek (2003) e George (2003) expõem o DMAIC como uma metodologia que possibilita a implementação de melhoria contínua nos processos.

Nessa direção, será realizado neste trabalho um estudo de caso em parceria com uma fabricante de embalagens de alumínio para bebidas. A empresa apresentou uma demanda que abrange a diminuição da taxa de falha que acomete um ativo físico da planta industrial, o que ocasiona muitas paradas emergenciais para a realização de atividades de manutenção corretiva, afetando negativamente a disponibilidade da produção, aumentando os custos de operação da empresa bem como o seu índice de lucro cessante.

Dessa forma, visando propor uma solução para esse problema, um componente de uma máquina industrial responsável pela alta taxa de falha que acomete a linha produtiva da empresa será alvo de uma análise de confiabilidade, sendo, posteriormente, apresentado um plano de manutenção fundamentado em parâmetros de confiabilidade para este. Nesse sentido, o presente trabalho será abordado por meio do avanço das etapas do DMAIC, que podem ser exibidas como:

1. D - *Define* (definir, em português);
2. M - *Measure* (medir, em português);
3. A - *Analyze* (analisar, em português);
4. I - *Improve* (melhorar, em português);
5. C - *Control* (controlar, em português);

3.2 DMAIC - Definição

A primeira etapa do DMAIC consiste na definição do problema atual. Nesta fase, o presente trabalho visa definir o problema a ser estudado bem como objetiva determinar os atributos que o cliente alvo da operação considera importantes para o item de análise, traduzindo a voz do cliente em informações técnicas de engenharia por meio da aplicação do QFD (Desdobramento da Função de Qualidade, em português).

A definição do problema, por sua vez, abrange a exploração da máquina (elucidando seus principais conjuntos de operação, bem como os seus principais componentes e respectivas funções), chegando por fim, na peça considerada objeto do estudo de caso. Tal empreendimento envolve também a apresentação do modo de falha ao qual o presente trabalho pretende fixar-se, bem como uma análise das possíveis causas elencadas para o modo de falha estudado através da aplicação do Diagrama de Ishikawa. Nesta fase um fluxograma (Série de Riscos) também será implementado objetivando fazer um estudo do encadeamento lógico dos eventos que levam a ocorrência do modo de falha que está sendo tratado.

3.3 DMAIC - Medição

Em vista de estimar a confiabilidade de componentes de engenharia, a aquisição de dados de falha se faz necessária. Esses dados podem ser provenientes de testes realizados em bancada, ou oriundos de operações em campo por meio do registro próprio de programas de garantia ao cliente ou ainda mediante o registro de atividades de manutenção elaborado pela equipe de PCM da empresa.

Nesta fase do DMAIC, a realização de uma medição quantitativa do intervalo de quebra ou tempo até a falha (TTF) é pretendida. De acordo com Birolini (2017), esse procedimento deve ser realizado considerando uma amostra aleatória e representativa da população de dados de TTF's constantes no banco de dados da empresa.

Os dados de tempo até a falha são registrados pela empresa a contar do momento em que a máquina, após passar por procedimento de reparo ou substituição de componente (estando inativa durante esse tempo), passa a operar novamente de acordo com o estabelecido pelo seu fabricante. Esse intervalo compreende o reinício do funcionamento pleno da máquina até uma nova parada por conta de uma quebra do referido componente devido á mesma causa de falha que está sendo tratada.

Como fora abordado na seção 1.5.1, em virtude das restrições impostas por meio da política nacional de isolamento social em decorrência da pandemia do novo coronavírus (COVID-19), tornou-se impraticável a realização de visitas em chão de fábrica no período em questão. Dessa forma, as informações de campo não puderam ser obtidas. Portanto, a alternativa será de assumir para esta fase da metodologia a randomização de TTF's a partir de um banco de dados que dispõe de informações empíricas para diversos componentes industriais proposto por Bloch e Geitner (1997) e apresentado na seção 3.3.1.

3.3.1 Randomização de dados de falha

Dodson e Schwab (2006) exploram uma técnica para randomizar dados de falha relacionada à distribuição de probabilidade de *Weibull*. Essa técnica está associada ao método de estimativa de parâmetros distribucionais da máxima verossimilhança. Os parâmetros de forma e de escala da distribuição de *Weibull* são representados na equação 2.20 por β e θ , respectivamente.

Dodson e Schwab (2006) também apresentam a distribuição de *Weibull* para a modelagem de dados quando não se conhece a função densidade de probabilidade mais apropriada para um determinado conjunto de dados de tempo até falha (TTF), em função da flexibilidade do parâmetro de forma da distribuição. Por consequência, a função de *Weibull* é frequentemente empregada na determinação de confiabilidade de componentes e de sistemas de engenharia.

Neste trabalho, o método de randomização de dados de tempo até a falha (TTF) encontra-se fundamentado na equação 3.1, sendo implementado computacionalmente por meio da linguagem algorítmica *Python* 3+ visando criar uma solução numérica para o estimador da máxima verossimilhança aplicada para a distribuição de *Weibull* (ver equação 2.36). O termo ρ na equação 3.1 refere-se a valores aleatórios compreendidos no intervalo entre zero e um, o que, em termos estatísticos, significa dizer que a concepção dos TTF's segue as diretrizes de um experimento de caráter aleatório, gerando uma amostra

representativa da população.

$$TTF's = \theta[-\ln(1 - \rho)]^{1/\beta} \quad (3.1)$$

É possível notar por meio da equação 3.1 que os valores de TTF's randomizados estão intimamente relacionados a valores específicos de β e θ . Isso significa dizer que ao final da implementação do modelo da máxima verossimilhança, esses mesmos valores referentes, respectivamente, aos parâmetros de forma (β) e de escala (θ) da distribuição de *Weibull* precisam ser obtidos como método de validação para o cálculo.

Bloch e Geitner (1997) apresentam em seu trabalho um banco de dados de valores característicos para β e θ , considerando dezenas de componentes comuns ao ambiente industrial, exibidos por meio da figura 28 na seção 5.2. Tais valores foram coletados por meio de bancadas de teste para fins educacionais, e que ocasionalmente podem servir para promover um possível *benchmarking* (DUTRA, 2019). Esses dados serão usados como parâmetros de verificação da convergência da solução numérica proposta neste trabalho para o estimador da máxima verossimilhança aplicada à distribuição de *Weibull* (equações 2.36).

Como explanado na seção 2.5.15, o método de máxima verossimilhança é conhecido por ser o modelo matemático mais preciso para estimar parâmetros distribucionais. Para tanto, a adoção de técnicas de iterações são necessárias para calcular a raiz da equação da máxima verossimilhança para *Weibull*. Este trabalho propõe uma solução numérica computacional (ver seção 4) utilizando o Teorema matemático da Bissecção em conjunto com o Teorema de Bolzano para a realização das iterações. Um erro de 10^{-4} também foi estabelecido como método de parada para essas repetições, bem como foi convencionalmente (somente para o fim de exemplificação da análise a ser empreendida no trabalho) uma confiança de 95% para o resultado da estimativa, ficando este valor a critério da empresa. O intervalo [0,0001; 50] foi definido como escopo de análise para que a raiz da equação 2.36 pudesse ser encontrada.

3.4 DMAIC - Análise

Nesta fase do DMAIC o trabalho visa elaborar um parecer a respeito dos níveis de confiabilidade do componente objeto do estudo de caso. Essa análise também será executada por meio de um ambiente computacional implementado por este trabalho, o qual se utilizará dos parâmetros da distribuição de *Weibull* estimados na etapa anterior (definição), a partir dos dados de falha (TTF) que foram randomizados.

Uma vez conhecidos os parâmetros da função densidade de probabilidade modeladora dos tempos até falha, torna-se realizável estimar as principais medidas de confi-

abilidade para o componente analisado, tais como: (i) Função Confiabilidade $R(t)$; (ii) Função de Distribuição Acumulada $F(t)$ ou Probabilidade de Falha; (iii) Função de Risco ou Taxa de Falha Instantânea $h(t)$ e tempo médio para a falha (MTTF).

O *software* implementado neste trabalho traz uma solução numérica para a estimativa de cada uma dessas medidas, considerando um intervalo de confiança de 95% para o resultado.

3.5 DMAIC - Melhoria (*Improve*)

Uma vez conhecidos os dados de confiabilidade relacionados á vida operacional do componente, torna-se realizável planejar atividades de manutenção com base nas informações probabilísticas obtidas. Nesta fase do DMAIC será abordado o procedimento adotado a fim de se programar as frequências das atividades de inspeção e de substituição do componente de análise.

O objetivo dessa etapa no trabalho será de propor práticas de manutenções com bases nos resultados de confiabilidade obtidos na fase anterior (Análise) que apresentem-se como soluções em ordem de diminuir a taxa de falha da peça, e conseqüentemente, de promover uma redução dos índices de parada da produção na fábrica por ocorrência da indisponibilidade de operação da máquina detentora do componente estudado.

3.6 DMAIC - Controle

Nessa fase do DMAIC a realização do monitoramento dos resultados propostos na etapa anterior será recomendada, em vista de validar se a melhoria proposta suprirá de fato as necessidades técnicas e econômicas da empresa. Portanto, nessa etapa são avaliados na prática os resultados e impactos das alterações que foram implantadas.

Em vista de auxiliar na etapa de controle da taxa de falhas que acomete o componentes de estudo, e conseqüentemente, o desempenho dos processos de manufatura da fábrica, um plano de ação será proposto nessa etapa sob os moldes de um Diagrama de Decisão, estabelecendo check-lists que auxiliarão o encarregado pela manutenção a seguir os procedimentos e prazos determinados por via da análise de confiabilidade realizada na fase anterior (melhoria).

A figura 18 apresenta no formato de um fluxograma o caminho a ser percorrido neste trabalho através de cada uma das etapas do DMAIC definidas nessa seção.

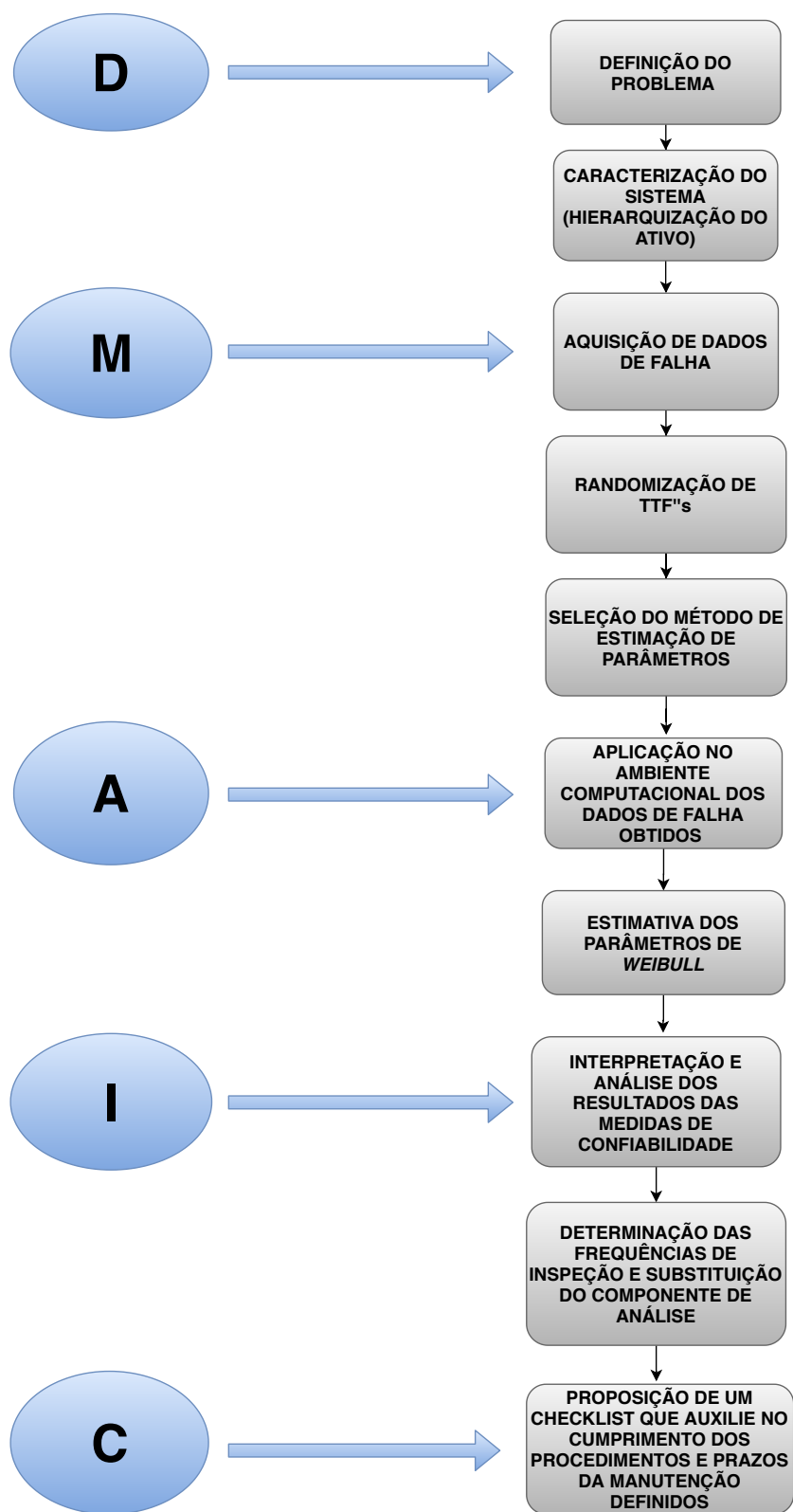


Figura 18 – Etapas do DMAIC implementadas como método de abordagem. Fonte: Elaborado pelo autor

4 AMBIENTE COMPUTACIONAL

Neste capítulo os principais fundamentos sobre os quais o *software* implementado encontra-se embasado serão abordados. O cenário de concepção do ambiente computacional também será apresentado nessa etapa.

Não obstante, o capítulo também propõe realizar uma vinculação entre as modelagens matemáticas apresentadas por meio da seção 2.5 e utilizadas para o cálculo das medidas de confiabilidade do componente analisado, e o ambiente computacional que fora desenvolvido.

4.1 Concepção e principais fundamentos do ambiente computacional

A idealização do ambiente computacional apresentado nessa seção é consequência de um trabalho de Iniciação Científica que tem por tema "Desenvolvimento de procedimentos computacionais aplicados à realização de análises e execução de procedimentos para demonstração de confiabilidade de produtos e sistemas na indústria", realizado em nome da Universidade de Brasília e subsidiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (Fapdf). A pesquisa data seu início em julho de 2019, findando em dezembro de 2020, e contou com a orientação do Prof. Dr. Eng. Henrique Gomes de Moura.

O *software* concebido sob os moldes da linguagem algorítmica *Python 3+* teve por objetivo, ao longo do seu desenvolvimento, a estruturação dos principais procedimentos aplicados à realização de testes acelerados na indústria, em ambiente computacional. Nessa direção, seu escopo de atuação compreende as seguintes etapas procedurais:

1. Modelagem de Funções de Densidade de Probabilidade aplicadas às variáveis de tempo de falha.
2. Programação e aplicação de modelos lineares para testes acelerados (procedimentos para determinação de fatores de aceleração do ensaio).
3. Programação e aplicação de modelos não lineares para testes acelerados (equações de *Arrhenius*, *Eyring* e Lei da Potência Inversa para análises de confiabilidade).
4. Aplicação do modelo da máxima verossimilhança para previsão de falhas ao longo do tempo ou ciclos praticados.

5. Documentação de códigos (*Python 3+*), geração de gráficos, diagramas de fluxo de dados e diagramas de blocos utilizados para o mapeamento completo das soluções desenvolvidas, levando á constituição de um ambiente completo de trabalho.

No presente trabalho, o software desenvolvido fará uso das etapas 1, 4 e 5 definidas acima, visando obter a estimativa de vida útil do componente analisado (por meio de um estudo de caso) através de uma análise de confiabilidade, além de viabilizar a elaboração de um plano de manutenção fundamentado em métricas de confiabilidade para este, utilizando-se dos resultados probabilísticos obtidos da análise empreendida na etapa 4.

Não obstante, também será explorado na subseção 4.2.3 um modelo computacional de randomização de dados de falha, em vista de municiar a etapa 4 com informações de tempo até a falha (TTF) concebidos aleatoriamente, de modo a não produzir uma amostra de caráter tendencioso.

4.2 Estruturação dos procedimentos matemáticos em ambiente computacional

Nesta seção serão abordados os principais procedimentos matemáticos envolvidos na estimativa dos parâmetros de forma (β) e de escala (θ) da distribuição de *Weibull*, em ambiente computacional. Nesse mesmo sentido, para que a raiz da equação da máxima verossimilhança aplicada a distribuição de *weibull* (equação 2.36) possa ser calculada, os Teoremas da Bissecção e de Bolzano serão implementados concomitantemente ao longo da estimativa.

Como explanado na seção 2.5.15, o método de estimação de parâmetros da máxima verossimilhança é caracterizado por oferecer maior eficiência e precisão para o resultado, em comparação com os modelos de *Hazard Plotting* e Gráfico de probabilidade, sendo selecionado por esse motivo para ser implementado na análise de confiabilidade empreendida neste trabalho.

Não obstante, o Teorema da Bissecção, por sua vez, apresenta-se como um método numérico bastante implementado para o cálculo de raízes, e consiste em dividir o intervalo $[a, b]$ de uma função contínua $f(x)$, de forma iterativa, sempre ao meio. Em vista de verificar se a raiz está contida na primeira ou na segunda metade do intervalo inicial $[a, b]$, o teorema de Bolzano é utilizado, sendo repetido esse mesmo procedimento na próxima iteração para aquela metade que contém a raiz de $f(x) = 0$, isto é, aquela em que a função $y = f(x)$ tem valores numéricos com sinais opostos nos seus extremos.

4.2.1 Estimador da máxima verossimilhança

Para efeito de implementação da equação da máxima verossimilhança para a distribuição de *Weibull* em ambiente computacional, a referida formulação matemática foi dividida em três partes principais, onde nas primeiras duas repartições o somatório considera a inserção de todos os dados de tempo até falha (no algoritmo simbolizado por "x"), sejam eles censurados ou completos, ao passo que na terceira parte do somatório somente os dados completos (não censurados) são inseridos. Estruturas condicionais e laços de repetição constituem a base algorítmica desse fragmento apresentado.

A parcela do código computacional (estruturado em *Python*, versão 3.7) responsável pela solução da equação 2.36 pode ser presenciada por meio da figura 19.


```

#MODELO DA MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA, CONSIDERANDO DADOS COMPLETOS (NÃO
CENSURADOS):

if censurados == 0:

    for i in range(0, dados):
        x = float(input('Insira o {}º TTF: '.format(i + 1)))

        TTFs_todos.append(x)

    for ind in range(0, len(TTFs_todos)):

#SOMATÓRIO PARTE 1 DA EQUAÇÃO DA MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA PARA WEIBULL:

        f_part_a_1 = ((TTFs_todos[ind]) ** a) * (math.log((TTFs_todos[ind]
))))
        somatorio_a_1 += f_part_a_1

        f_part_b_1 = ((TTFs_todos[ind]) ** b) * (math.log((TTFs_todos[ind]
))))
        somatorio_b_1 += f_part_b_1

        f_part_beta_1 = ((TTFs_todos[ind]) ** pm) * (math.log((TTFs_todos
[ind])))
        somatorio_beta_1 += f_part_beta_1

#SOMATÓRIO PARTE 2 DA EQUAÇÃO DA MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA PARA WEIBULL:

        f_part_a_2 = (TTFs_todos[ind]) ** a
        somatorio_a_2 += f_part_a_2

        f_part_b_2 = (TTFs_todos[ind]) ** b
        somatorio_b_2 += f_part_b_2

        f_part_beta_2 = (TTFs_todos[ind]) ** pm
        somatorio_beta_2 += f_part_beta_2

#SOMATÓRIO PARTE 3 DA EQUAÇÃO DA MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA PARA WEIBULL:

        f_part_3 = math.log((TTFs_todos[ind]))
        somatorio_3 += f_part_3

#CÁLCULO FINAL DOS SOMATÓRIOS:

        f_a = (somatorio_a_1 * (somatorio_a_2 ** (-1))) - ((1 / r) *
somatorio_3) - (1 / a)

        f_b = (somatorio_b_1 * (somatorio_b_2 ** (-1))) - ((1 / r) *
somatorio_3) - (1 / b)

        f_beta = (somatorio_beta_1 * (somatorio_beta_2 ** (-1))) - ((1 / r) *
somatorio_3) - (
            1 / pm)

```

Figura 19 – Fragmento do algoritmo computacional dedicado à solução da equação da máxima verossimilhança para *Weibull*.

Fonte: Ambiente computacional implementado pelo autor

Nela, é possível notar que a modelagem matemática é feita sincronicamente para as variáveis "a" e "b", as quais simbolizam o intervalo inicial de análise da equação 2.36 (estimador da máxima verossimilhança de *Weibull*), e a variável "beta", simbolizando o ponto médio do respectivo intervalo, a contar da segunda iteração de Bolzano. A variável "pm" também faz menção ao centro do referido intervalo, todavia está restrita a primeira iteração. Para a análise empreendida no estudo de caso deste trabalho, não foram considerados dados censurados.

4.2.2 Teorema da Bissecção e Teorema de Bolzano

Como foi abordado na seção 4.1, a aplicação conjunta do Teorema da Bissecção e Teorema de Bolzano propicia a realização das iterações necessárias a fim de atualizar o intervalo inicial [a, b] de análise do estimador da máxima verossimilhança, favorecendo a convergência do seu ponto médio "beta" na direção da raiz da função.

Para efeito de demonstração de aplicação da metodologia matemática apresentada neste trabalho, um erro de 10^{-4} foi estabelecido como método de parada para essas iterações, bem como foi convencionada uma confiança de 95% para o resultado da estimativa dos parâmetros β e θ . De igual modo, o intervalo [0,0001, 50] foi definido como escopo de análise. A figura 20 exibe o fragmento do algoritmo computacional dedicado à realização das iterações para a estimativa do parâmetro de forma β da distribuição de *Weibull*, presente na equação 2.36.

```
#APLICAÇÃO CONJUNTA DO TEOREMA DA BISSECÇÃO E TEOREMA DE BOLZANO:

if f_a * f_b < 0:                                #A raiz está entre "a" e "b".
    while math.fabs(b - a) > e:                  #Critério de parada das iterações

        beta = (a + b) / 2                       #Cálculo do ponto médio.
        if f_beta == 0:
            # cont += 1
            print('-' * 40)
            print('{}° ITERAÇÃO:'.format(cont))
            print('Parâmetro de forma: {}'.format(beta))
            break
        else:
            if f_a * f_beta < 0:                 #A raiz está entre "a" e "beta".
                b = beta

            else:                                #A raiz está entre "b" e "beta".
                a = beta
            cont += 1
    else:
        print('Não existe raiz no intervalo [{} , {}]'.format(a, b))
```

Figura 20 – Fragmento do algoritmo computacional dedicado à realização das iterações para o cálculo da raiz da equação da máxima verossimilhança para *Weibull*. Fonte: Ambiente computacional implementado pelo autor

4.2.3 Randomização de tempos até falha (TTF)

O algoritmo desenvolvido para a randomização de dados de tempo até a falha (TTF) está fundamentado na equação 3.1 vinculada a distribuição de *Weibull*, elucidada por [Dodson e Schwab \(2006\)](#). A parcela do algoritmo *Python* encarregada pela randomização dos TTF's pode ser observada por meio da figura 21.

```
import random
import math

TTFs = []
quantidade_TTF = int(input('Insira a quantidade de dados de falha desejada: '))
theta = float(input('Insira o parâmetro de escala: '))
beta = float(input('Digite o parâmetro de forma: '))

for i in range(1, quantidade_TTF + 1):
    randomizado = random.random()
    criacao_TTF = theta * (-math.log(randomizado)) ** (1 / beta)
    print(math.trunc(criacao_TTF))
    TTFs.append(criacao_TTF)
TTFs.sort()
print(TTFs)
```

Figura 21 – Fragmento do algoritmo computacional dedicado à randomização de dados de tempo até a falha (TTF).

Fonte: Ambiente computacional implementado pelo autor

5 RESULTADOS

Conforme foi abordado pelo capítulo 3, cada etapa da metodologia DMAIC é utilizada numa ordem procedural de maneira a expor os resultados pretendidos nesta seção, começando pela fase de definição do problema por meio da apresentação da máquina, seus principais conjuntos e componentes, até a apresentação da causa de falha raiz que acomete o componente de estudo.

A posteriori, a etapa de medição é abordada através da prática de randomização de dados de tempo até a falha (TTF). Em seguida, a fase de análise apresenta a estimativa dos parâmetros distribucionais da função densidade de probabilidade de *Weibull*, propiciando o cálculo das principais medidas de confiabilidade associadas a operação do componente de estudo. Não obstante, a fase de proposição de melhoria (*Improve*) preconiza as frequências de inspeção e de substituição do componente analisado. Adiante na etapa de controle, práticas de controle da manutenção do componente são apresentadas em formato de um diagrama de decisão, visando facilitar a execução dos procedimentos e prazos estipulados.

5.1 DMAIC - Definição

São assuntos a serem tratados nessa seção a definição da máquina detentora do componente objeto do estudo de caso, passando pela exposição de seus principais conjuntos e componentes. Por meio da aplicação de um QFD (Desdobramento da Função Qualidade), uma importante ferramenta utilizada na gestão da qualidade de processos, são abordados os principais requisitos do cliente em paralelo com os requisitos técnicos de projeto estabelecidos para a máquina detentora do componente de estudo.

É realizada, de igual modo, uma análise da causa raiz de falha do componente de estudo por meio da aplicação do Diagrama de *Ishikawa*, uma ferramenta bastante implementada no contexto operacional industrial. Ainda, em vista de demonstrar o encaideamento de eventos de falhas induzidas uma série de risco é apresentada, evidenciando os possíveis modos de falha associados à interrupção do funcionamento da máquina, detentora do componente objeto do estudo de caso.

5.1.1 Estudo de caso: Análise de confiabilidade de um retentor hidráulico industrial

O presente trabalho foi realizado junto a uma renomada fabricante de embalagens de alumínio para bebidas. O objetivo foi de oportunizar a demonstração da aplicabili-

dade prática da metodologia apresentada neste trabalho, utilizando do contexto de uma empresa pioneira na ramo em que se aplica.

Foi convencionado que neste trabalho a apresentação do componente (objeto de análise do presente estudo de caso) ocorra por meio da implantação do pilar de Hierarquização dos ativos, próprio da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC). Desta forma, é pretendido seguir uma orientação de apresentação desta seção que passa pela esfera de máquina, seus principais conjuntos, bem como seus principais componentes, sucessivamente.

A máquina *CMB5000Bodymaker* (detentora do componente a ser estudado) tem por função principal transformar uma pré-forma metálica em lata para bebidas, efetivamente. O mecanismo básico de transformação da lata se dá por via de um processo de estiramento à frio do alumínio. Este alongamento ocorre em meio aquoso (óleo solúvel), liberando calor e sendo resfriado por este óleo que provém de um sistema externo. A *Bodymaker* (BM), funciona de modo automático dirigido por um Controlador Lógico Programável (CLP) e rodando a uma velocidade média de trabalho entre 400 e 450 latas por minuto. Na Figura 22, é exibido o modelo de máquina *Bodymaker*.



Figura 22 – Máquina CMB5000 *Bodymaker*. Fonte: *CarnaudMetalbox Engineering website*.

A *Bodymaker* está situada no *front-end* (etapa inicial da produção) da linha produtiva responsável pela manufatura do corpo da lata. Trata-se de uma prensa excêntrica, horizontal e de funcionamento contínuo, tendo como seus principais conjuntos os itens a seguir:

- Unidade Hidráulica;
- Motor Principal;
- Volante e embreagem;
- Virabrequim e haste (movimento horizontal);
- Formação da lata;

- Alimentação de copos;

Prosseguindo pela estrutura hierárquica do ativo, a exposição dos principais componentes da máquina pode ser observada por meio da Figura 23. O componente destacado na referida imagem (retentor de vedação) refere-se ao objeto de estudo do presente trabalho, e será apresentado logo em seguida.

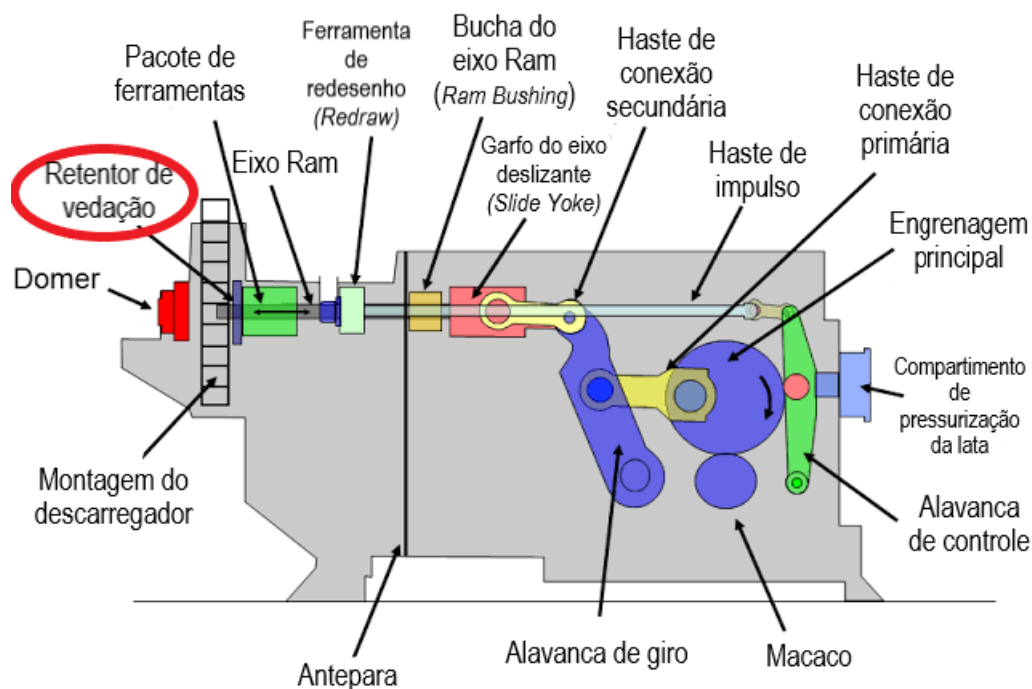


Figura 23 – Principais componentes da CMB5000 *Bodymaker*. Fonte: (IPS, 2018)

No setor industrial, um dos componentes mais utilizados para a função de vedação é o retentor. Também denominado de retentor de redutor, é caracterizada como uma peça de material polimérico que tem por função reter materiais, não permitindo que os fluidos retidos venham evadir-se, evitando o desperdício do material (fluidos), ao mesmo tempo em que é evitado o prejuízo do funcionamento inconforme da máquina em virtude da falta de lubrificação adequada. O retentor pode vedar fluidos como graxas, óleos, além de outras substâncias.

Além da aresta do lábio de vedação (geometria do retentor responsável por impedir a fuga do fluido), um retentor é constituído por partes como: mola, carcaça e vedação auxiliar. A mola possui função de amortecer o esforço mecânico produzido pelo eixo deslizante. A carcaça é composta internamente por um anel metálico que objetiva orientar a direção para a qual o eixo deslizante se movimenta, além de servir de apoio para outros componentes. A vedação auxiliar, por sua vez, visa proteger o material do retentor contra partículas de sujeira que podem prejudicar o funcionamento ideal do componente. Por meio da Figura 24, a estrutura de um retentor hidráulico de vedação é apresentada,

bem como é mostrada a forma em que este é alojado no *Domer* (Figura 25) (conjunto responsável pela formação do fundo da lata de alumínio).



Figura 24 – Exemplo de um retentor de vedação hidráulico. Fonte: (ASIA,)



Figura 25 – Exemplo de instalação do retentor de vedação hidráulico junto ao conjunto *Domer* da *Bodymaker*. Fonte: Fotografia tirada por mecânico de campo.

5.1.2 Um paralelo entre requisitos do cliente e requisitos de projeto

Como apresentado na seção 2.3, uma das principais ferramentas de controle da qualidade utilizada na definição de requisitos para produtos, é o Desdobramento da Função Qualidade (QFD). Essa análise visa estabelecer um alinhamento entre os desejos do cliente e os requisitos técnicos para o projeto, objetivando atingir a plena satisfação do cliente alvo e, desta forma, oportunizar sua fidelização.

No contexto dos setores de Planejamento e Controle da Produção (PCP) e Planejamento e Controle de Manutenção (PCM), o presente estudo visa assumir como sendo o cliente alvo, as figuras dos planejadores, programadores, analistas e operários das duas frentes da empresa: manufatura e manutenção. A análise empreendida, por sua vez, é

realizada em parceria com o comitê de *Lean/TPM* da corporação, sob os moldes da concepção de que setor de PCM visa vender confiabilidade e disponibilidade a baixo custo para o setor de PCP (MOUBRAY, 1996).

Nessa direção, objetivando elencar os requisitos técnicos de operação para o ativo físico (máquina *Bodymaker*), o presente trabalho propôs-se a ouvir a voz do cliente possibilitando implementar o desmembramento da função qualidade (tabela 2).

Por meio da tabela 2, é possível observar a região intitulada de "Requisitos do cliente". Nesta seção foram estipuladas as principais necessidades do clientes, tendo em vista a máquina *Boymaker*, detentora do componente retentor hidráulico de vedação, sendo este, objeto principal do estudo de caso.

Ainda na tabela 2, na seção denominada de "Requisitos do projeto", a proposta consiste na tradução em termos técnicos (à nível de engenharia) daqueles requisitos obtidos diretamente do cliente-alvo. O objetivo é de facilitar a compreensão e análise por parte do comitê de engenharia responsável pelo empreendimento de melhoria da máquina, identificando as possíveis soluções técnicas que permitirão atingir a(s) meta(s) associada(s) aos requerimentos do potencial usuário.

Através da análise do desmembramento da função qualidade (QFD) é possível compreender que grande parte dos requisitos elucidados pelo cliente direciona o trabalho para uma proposição de redução das taxas de falha atuais dos componentes alvos da investigação, bem como de sua máquina detentora, o que pode ser empreendido por meio do mapeamento das curvas de confiabilidade $R(t)$ e da taxa de risco $h(t)$ do componente para o qual é pretendido empregar melhorias de desempenho operacional.

Tal façanha propiciará o planejamento de um programa de manutenção fundamentado em métricas de confiabilidade, o que promoverá o aumento na segurança operacional do usuário de máquina, a redução de danos causados ao meio ambiente por decorrência do agravamento do estado de falha, a diminuição dos índices de intervenção emergencial de manutenção e o conseqüente aumento da disponibilidade inerente da máquina, bem como a redução da geração de refugos, por ocasião da redução da taxa de falha dos componentes.

Tabela 2 – Desdobramento da Função Qualidade (QFD)

Requisitos do cliente	Requisitos do projeto
(1) - A máquina precisa ser resistente.	(1) - A máquina necessita suportar as solicitações de esforços de trabalho (Materiais que apresentem alta tenacidade, resistência à fadiga, resistência a fratura e resistência à fluência).
(2) - A máquina precisa ser durável.	(2) - A máquina necessita apresentar uma baixa taxa de falhas, permitindo um índice satisfatório de disponibilidade para o ativo.
(3) - A máquina precisa ser segura para ser operada.	(3) - Caso o componente falhe, ele não deve não causar riscos de morte, lesões corporais ou danos ao ambiente.
(4) - A máquina precisa apresentar fácil inspeção.	(4) - Empregar sensores de análise de temperatura, vibração e pressão de fluido junto à máquina.
(5) - A máquina precisa apresentar fácil reposição/conserto de componentes.	(5) - Fabricar componentes à prova de erros de montagem (<i>Poka Yoke</i>); construção de planos de inspeção e manutenção detalhados e simplificados.
(6) - A máquina precisar ser de fácil limpeza.	(6) - Implementação do modelo 5S no ambiente de trabalho.
(7) - A máquina precisa oferecer um baixo custo de aquisição de peças sobressalentes.	(7) - Nacionalizar peças e componentes para substituição em vista de baratear o custo de manutenção.
(8) - A máquina baixo precisa oferecer baixo custo de manutenção.	(8) -Reduzir os custos indiretos da manutenção como: lucro cessante, depreciação do ativo e custos induzidos.
(9) - A máquina precisa permitir práticas ágeis de manutenção.	(9) - Apresentar um tempo médio para reparo (MTTR) menor em relação aos concorrentes; lançar mãos de ferramentas de gestão de processos como o KANBAN.

5.1.3 Análise de falha do componente

Ao aplicar o Princípio de Pareto no banco de dados da empresa, foi possível identificar que o principal gargalo associado ao não atendimento das necessidades dos cliente (elucidadas por meio do QFD), tais como baixos níveis de disponibilidade da máquina e alto custo de operação (devido aos altos dispêndios do setor de manutenção), refere-se à falha por desgaste (perda de massa) do retentor de vedação hidráulico.

Neste contexto, objetivando encontrar as possíveis causas para o modo de falha apresentado, foi elaborado um Diagrama de Causa e Efeito por via de um *brainstorming* realizado em conjunto com a comissão de PCM (Planejamento e Controle da Manutenção) e PCP (Planejamento e Controle da Produção) da empresa.

As possíveis causas para o desgaste do retentor de vedação podem estar associadas a vários contextos diferentes: meio ambiente, material, máquina, medida, método e mão de obra. No entanto, o presente trabalho possui como escopo a realização de conjecturas associadas somente à esfera de máquina do Ishikawa 6M.

O Diagrama de Causa e Efeito (*Ishikawa*) pode ser observado através da figura 2. Nela, é possível verificar que as principais causas de falha levantadas para o modo de falha "desgaste do retentor hidráulico" são:

- Queda de pressão de óleo na linha hidráulica;
- Elevação de temperatura da máquina para acima da temperatura ideal de trabalho (tal fato pode ser induzido pelo desalinhamento do conjunto motor-redutor);
- Elevação do índices de vibração da máquina (podendo ser ocasionado por afrouxamento de parafusos, desalinhamento do eixo principal e/ou desbalanceamento de massa do eixo principal);
- Vazamento de óleo hidráulico (podendo ser induzido por saturação do filtro de impurezas e/ou falha no ajuste das folgas);
- Desgaste prematuro de retentor nacionalizado (fora do padrão de qualidade);
- Desgaste prematuro de retentor por fricção excessiva do material (provocado por lubrificação insuficiente do eixo principal, e/ou queda do nível de viscosidade e densidade do óleo lubrificante);

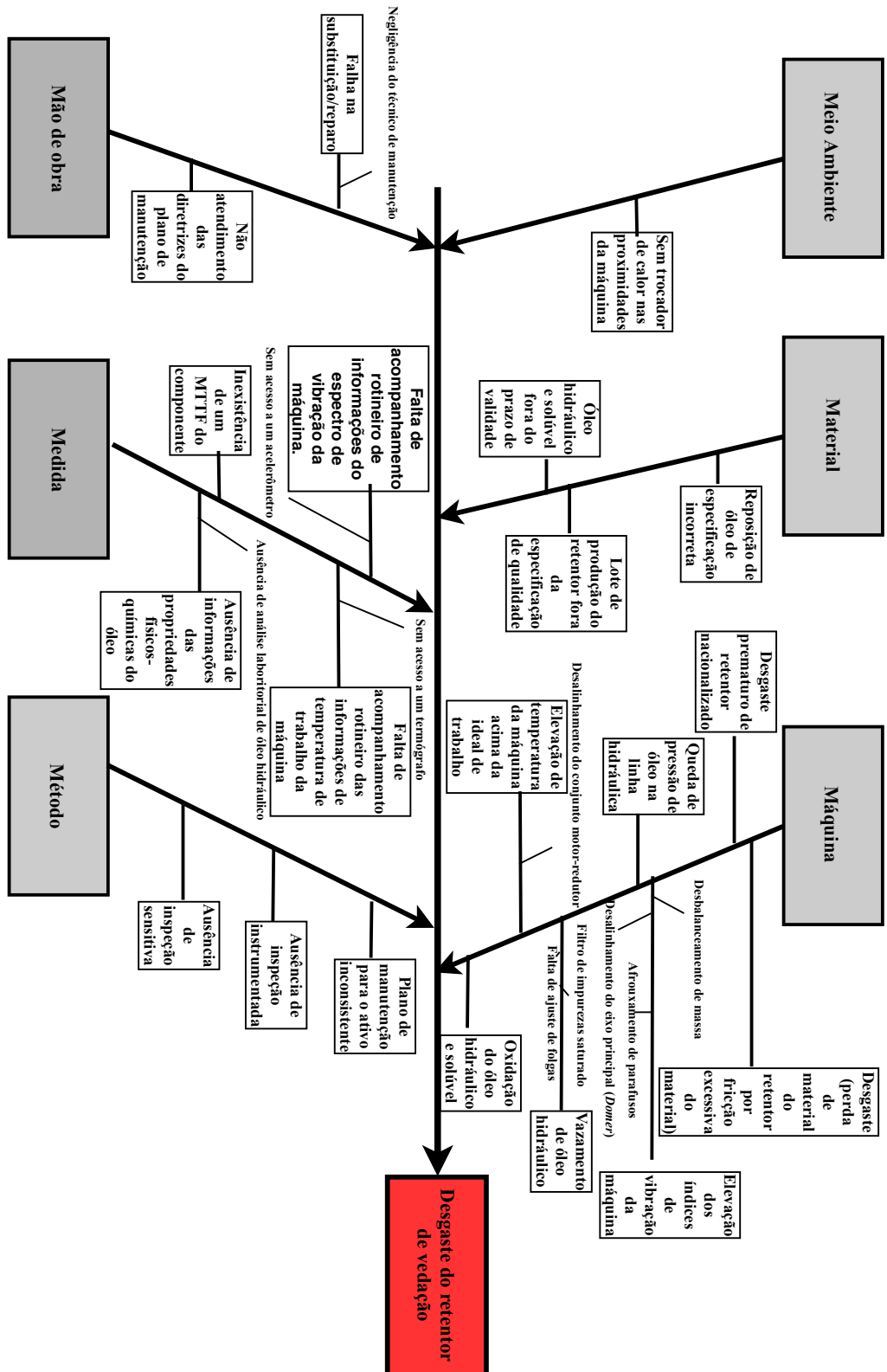


Figura 26 – Diagrama de Causa e Efeito de falha do retentor hidráulico. Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse seguimento, tendo vista os conceitos de falha potencial e funcional (ver seção 2.1.3), um mapeamento foi realizado, juntamente com o comitê técnico da empresa, visando elucidar uma interação entre os eventos de falha (blocos do fluxograma) relacionados entre si por meio de operadores lógicos "E" e "OU". O Operador "E" indica que para uma determinada falha ocorrer, dois ou mais eventos antecedentes necessitam ocorrer simultaneamente. O operador lógico "OU", por sua vez, assinala que para um determinado evento ocorrer, uma condição apenas necessita previamente ser satisfeita. Isto é, para que uma determinada falha ocorra, baste que somente uma falha antecessora também aconteça, seja ela qual for.

Na Figura 27 um fluxograma foi elaborado visando elucidar uma série de riscos aos quais o funcionamento da máquina *bodymaker* está submetido. Esta análise por árvore de eventos exibe o desgaste do retentor de vedação hidráulico (modo de falha estudado) como sendo o risco principal para o setor de PCM (Planejamento e Controle da Manutenção). Nesta direção, tal modo de falha caracteriza-se como sendo um dos eventos de maior contribuição para o risco principal sob a ótica do setor de PCP (Planejamento e Controle da Produção), a saber, a geração de refugos (latas com defeitos que não podem ser reprocessadas).

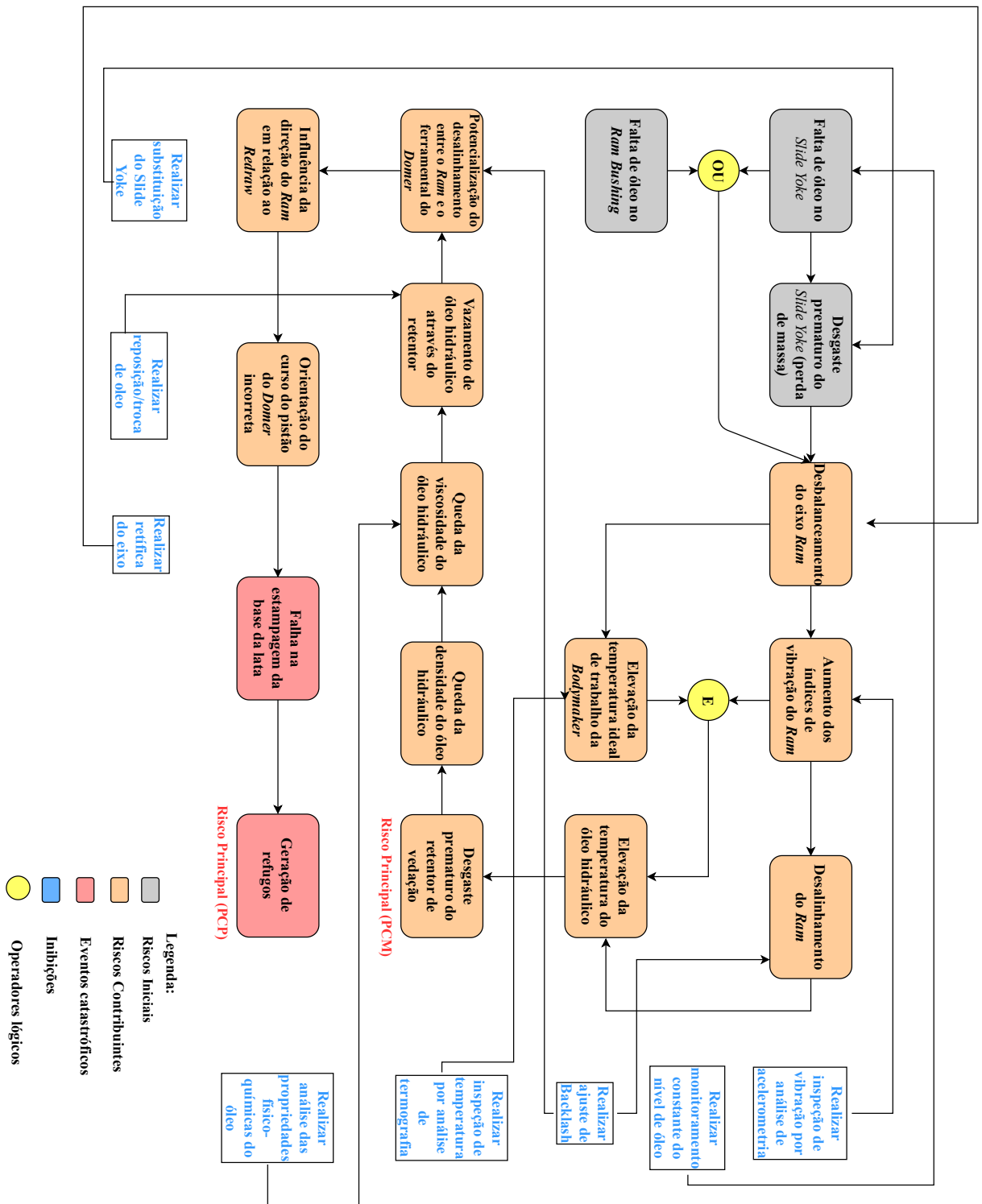


Figura 27 – Série de riscos para o funcionamento da máquina *Bodymaker*. Fonte: Elaborado pelo autor

Através da Figura 27, fica claro que a falha que acomete o componente de análise (retentor hidráulico), caracteriza-se como sendo, na verdade, uma falha induzida por outras inconformidades antecessoras, tais como o desgaste prematuro do garfo do eixo deslizante, que por sua vez, é ocasionado por outras três possíveis combinações de falha: Falta de óleo no garfo do eixo deslizante, falta de óleo na bucha do eixo Ram ou a combinação destes dois modos de falha. Também é possível verificar que o aumento combinado nos níveis de temperatura e vibração da máquina, ocasiona mais tarde, o desgaste prematuro do retentor de vedação.

5.2 DMAIC - Medição

Nesta seção, são explorados assuntos que permeiam a randomização de dados de tempo até a falha (TTF) e a estimativa dos parâmetros distribucionais da função densidade de probabilidade de *Weibull* por via da aplicação do método da máxima verossimilhança em conjunto com o Teoremas da Bisseção e de Bolzano, com o auxílio do ambiente computacional implementado neste trabalho.

[Dodson e Schwab \(2006\)](#) chamam a atenção para o fato de que a alternância do tamanho da amostra de dados de TTF's está intimamente ligada à variação do erro do resultado da estimativa dos parâmetros de *Weibul*.

Dessa maneira, visando examinar a convergência do resultado para os parâmetros de forma β e de escala θ de *Weibull* propostos por [Bloch e Geitner \(1997\)](#) conforme o tamanho da amostra é alterado, o presente trabalho propõe randomizar os dados de falha para dois planos diferentes A e B. Para efeito de implementação no algoritmo computacional, são considerados os valores de β e θ relacionados ao componente "anel de desgaste", como mostra a figura 28.

Visando promover uma adequação dos valores característicos exibidos para o escopo do presente estudo de caso, os valores de $\beta = 4$ e $\theta = 90.000$ foram selecionados (ver figura 28) pelo fato deste parâmetro de forma conceder à distribuição de *Weibul* um formato semelhante ao da distribuição Gaussiana (ver seção 2.5.13).

É sabido que no contexto da fabricante de latas de alumínio, o componente de vedação hidráulico apresenta um fator de deterioração diretamente proporcional ao tempo de uso, ou seu envelhecimento. Dessa forma, de acordo com [Moubray \(1996\)](#), para este caso, faz-se conveniente o uso de um fator de forma $\beta > 1$ em vista de conceber TTF's que representem uma causa de falha relacionada ao tempo de operação do retentor de vedação.

Tabela de Valores Característicos de Beta (β) e Eta (η)						
Item	Valores Beta- β (Fator de forma Weibull)			Valores Eta - η Vida característica de Weibull - em ciclos)		
	Baixo	Típica	Alto	Baixo	Típica	Alto
Componentes						
Juntas mecânicas	0,5	1.2	6	1.400.000	150.000	10.000.000
Facas	0,5	1	6	1.700.000	2.000.000	16.700.000
Porcas	0,5	1.1	1.4	14.000	50.000	500.000
Anéis "O-ring"	0,5	1.1	1.4	5.000	20.000	33.000
Pinos	0,5	1.4	5	17.000	50.000	170.000
Pivôs	0,5	1.4	5	300.000	400.000	1.400.000
Pistões (motores a combustão)	0,5	1.4	3	20.000	75.000	170.000
Bombas de óleo	0,5	1.1	1.4	13.000	50.000	125.000
Juntas mecânicas	0,8	1.4	4	3.000	25.000	50.000
Eixos de bombas centrífugas	0,8	1.2	3	50.000	50.000	300.000
Molas	0,5	1.1	3	14.000	25.000	5.000.000
Suportes de vibração	0,5	1.1	2.2	17.000	50.000	200.000
Anéis de desgaste	0,5	1.1	4	10.000	50.000	90.000
Válvulas (motores a combustão)	0,5	1.4	4	3.000	40.000	80.000

Figura 28 – Valores característicos de β e θ (de Weibull) para componentes industriais.
Fonte: (BLOCH; GEITNER, 1997)

Cada plano de randomização de dados contemplará um tamanho diferente de amostra. Os valores de TTF para os planos A, e B estão exibidos em ciclos/1000, e podem ser vistos nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Randomização de dados de falha para o retentor de vedação hidráulico, considerando uma amostra de 40 dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Plano A			
25.94	64.99	82.05	96.87
45.79	65.13	82.31	97.48
48.32	65.38	82.33	98.63
49.39	71.76	84.71	104.54
56.92	72.97	86.24	104.64
57.10	73.79	86.79	108.97
57.20	74.56	87.65	116.34
57.28	74.91	87.72	116.94
60.60	80.00	89.87	119.82
62.20	81.15	91.62	120.71

Tabela 4 – Randomização de dados de falha para o retentor de vedação hidráulico, considerando uma amostra de 10 dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Plano B	
35,31	85,28
36,21	90,57
59,17	95,71
63,24	99,93
80,94	119,58

Passadas treze iterações (ver figura 29) o resultado do estimador da máxima verossimilhança tendeu a convergir para os dados de entrada inseridos na análise de randomização ($\beta = 4$ e $\theta = 90.000$). Os resultados da estimativa dos parâmetros de forma (β) e de escala (θ) da distribuição de *Weibull* podem ser observados por meio da tabela 5. Nela é possível verificar que quanto maior é o tamanho da amostra (n) disponível, menor tende a ser o erro associado à convergência das iterações.

Como previsto, o parâmetro de forma $3 \leq \beta \leq 4$ sugere, neste caso, que a distribuição Gaussiana melhor modela os dados de tempo até falha, sendo esta a principal qualidade da distribuição de *Weibull*: amoldar-se à outras distribuições à medida em que seu parâmetro de forma é alterado. O valor de $\beta > 1$ também indica que a taxa de falha instantânea $h(t)$ do componente aumenta à medida que o seu valor de tempo de operação também avança, assinalando que o desgaste por perda de massa ocorrido sobre o retentor de vedação é devido ao seu tempo de uso (envelhecimento), fazendo menção à Função de Risco Crescente (FRD) apresentada por meio da demonstração da Curva da Banheira (ver seção 2.5.9).

O parâmetro de escala θ convergido para 88 faz menção à vida característica do componente. Segundo Dodson e Schwab (2006), 63,2% de todos os dados da população estão abaixo desse valor, independentemente do valor do parâmetro de forma β .

Tabela 5 – Comparação dos parâmetros de *Weibull* para o retentor de vedação hidráulico, considerando duas amostras de tamanhos diferentes de dados de falha: $n = 40$ e $n = 10$.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Plano	n	β	θ
A	40	4,09	88
B	10	3,27	86

Na figura 29 é exibida parte da interface do ambiente computacional implementado como solução numérica para a estimativa dos parâmetros distribucionais, onde o usuário é solicitado a inserir o tamanho da amostra de análise, quantidade de dados censurados,

além dos critérios de parada para as iterações do Teorema de Bolzano. Em seguida os dados de tempo até a falha podem ser inseridos de acordo com o tamanho da amostra selecionado. Na parte superior da figura 29 (interface com o usuário), para fins de demonstração, são exibidos apenas os 10 (dez) primeiros TTF's relativos ao Plano A.

O resultado das iterações pode ser visto na parte inferior da figura 29. A título de exemplo, são exibidas as quatro primeiras iterações seguidas da décima terceira e décima quarta iteração, onde a convergência para $\beta = 4,09$ e $\theta = 88$ ocorre.

```

Quantos itens estão sendo testados? 40
Quantos são os dados censurados? 0
Insira o INÍCIO do intervalo desejado para o desenvolvimento do Teorema da Bissecção: 0.0001
Insira o FINAL do intervalo desejado para o desenvolvimento do Teorema da Bissecção: 50
Digite o valor do erro desejado para o Teorema da Bissecção: 0.0001
Insira o 1° TTF: 25.94
Insira o 2° TTF: 45.79
Insira o 3° TTF: 48.32
Insira o 4° TTF: 49.39
Insira o 5° TTF: 56.92
Insira o 6° TTF: 57.10
Insira o 7° TTF: 57.20
Insira o 8° TTF: 57.28
Insira o 9° TTF: 60.60
Insira o 10° TTF: 62.20

=====
1° ITERAÇÃO:
=====
f(a) = f(0.00010000) = -9999.99999054
f(b) = f(50.00000000) = 0.42802275
f(beta) = f(25.00005000) = 0.39737877
Logo:
Beta = 25.00
Theta = 109

=====
2° ITERAÇÃO:
=====
f(a) = f(0.00010000) = -9999.99999054
f(b) = f(25.00005000) = 0.39737877
f(beta) = f(12.50007500) = 0.32097317
Logo:
Beta = 12.50
Theta = 101

=====
3° ITERAÇÃO:
=====
f(a) = f(0.00010000) = -9999.99999054
f(b) = f(12.50007500) = 0.32097317
f(beta) = f(6.25008750) = 0.15194808
Logo:
Beta = 6.25
Theta = 92

=====
4° ITERAÇÃO:
=====
f(a) = f(0.00010000) = -9999.99999054
f(b) = f(6.25008750) = 0.15194808
f(beta) = f(3.12509375) = -0.11619414
Logo:
Beta = 3.13
Theta = 86

=====
13° ITERAÇÃO:
=====
f(a) = f(4.08944729) = -0.00017809
f(b) = f(4.10165430) = 0.00101673
f(beta) = f(4.09555079) = 0.00042000
Logo:
Beta = 4.10
Theta = 88

=====
14° ITERAÇÃO:
=====
f(a) = f(4.08944729) = -0.00017809
f(b) = f(4.09555079) = 0.00042000
f(beta) = f(4.09249904) = 0.00012113
Logo:
Beta = 4.09
Theta = 88

```

Figura 29 – Valores característicos de β e θ para componentes industriais, continuação.
Fonte: (BLOCH; GEITNER, 1997)

5.3 DMAIC - Análise

Uma vez estimados os parâmetros β e θ que identificam a função densidade de probabilidade de *Weibull*, o *software* implementado neste trabalho também sugere uma solução numérica para a estimativa das principais medidas de confiabilidade relacionadas à operação do componente analisado.

A aferição para Função de Confiabilidade $R(t)$, Função Acumulada de Falha $F(t)$ e Função de Risco ou Taxa Instantânea de Falha $h(t)$, é realizada considerando um intervalo de confiança para o resultado selecionado pelo próprio usuário do *software*. Foi convencionalizada uma confiança de 95 % e um $t = 90.000$ ciclos para o resultado de cada medida, em vista de adequar-se ao banco de dados apresentado por Bloch e Geitner (1997), ficando esse intervalo estabelecido, na prática, pela empresa.

Os resultados propostos pelo ambiente computacional anunciam que para um intervalo equivalente a 90 mil ciclos de operação do retentor de vedação hidráulico, a confiabilidade $R(t)$ associada ao funcionamento do componente é de 33,3% aproximadamente, ou seja, esta é a probabilidade de sobrevivência do item de análise até completar-se 90 mil ciclos de funcionamento. Por outro lado, a probabilidade de ocorrência da falha é representada por $F(t)$, sendo exatamente o complemento da medida de $R(t)$, isto é, 66,7% aproximadamente.

A Função de Risco $h(t)$, por sua vez, traz uma perspectiva da taxa de falha instantânea ou nível de risco imediato em função do tempo de operação do componente. Por meio da figura 30 é possível notar que, por exemplo, para $t = 90.000$ ciclos, a taxa de falha instantânea equivalente (compreendendo o intervalo infinitesimal entre $t + \Delta t$, adotando o limite de Δt tendendo para zero) é de 5% aproximadamente.

Outro ponto importante a ser interpretado através da análise do resultado da Função de Risco $h(t)$ para o componente estudado, é a similaridade observada entre a curva da taxa instantânea de falha crescente resultante dos dados amostrais randomizados para o retentor de vedação hidráulico, e a Função de Risco Crescente (FRD) referente à zona de desgaste da Curva da Banheira (ver figura 12), apresentada na seção 2.5.9. Tal análise reforça a predisposição natural de envelhecimento do retentor de vedação ao longo do seu tempo de operação, isto é, a manifestação de um padrão de falhas não-aleatórias relacionadas à idade do componente.

Nesta mesma direção, ainda na figura 30, o $MTTF = 79.886$ ciclos aponta para a medida central da curva modeladora dos TTF's, ou seja o valor médio de tempo até falha ou valor médio de vida útil do componente analisado.

5.4 DMAIC - Melhoria (*Improve*)

Uma vez conhecidas as principais medidas de confiabilidade associadas ao funcionamento do item de análise, esta fase do DMAIC objetiva estabelecer um prazo para a execução das práticas de inspeção e de substituição para o retentor de vedação hidráulico.

De acordo com Fogliato e Ribeiro (2009), a identificação a priori do padrão de falhas que acomete o componente o qual é pretendido submeter à atividades de manutenção é crucial em vista de determinar-se com segurança e eficiência um planejamento de manutenção para o ativo. Dutra (2019) concorda ao afirmar que a intervenção de manutenção de cunho preventivo (baseado no tempo) em componentes que não apresentam um fator de deterioração relacionado à idade, pode induzir defeitos no sistema, provocando a ocorrência de falhas funcionais prematuras que, de outra forma, poderiam não ter ocorrido.

Nesta direção, Moubray (1996) elucida que a tarefa de restauração/substituição programada deve ser realizada em intervalos um pouco menores do que a idade em que o desgaste efetivamente se inicia. De maneira mais rigorosa, o autor salienta que a frequência de uma tarefa de restauração/substituição programada é governada pela idade em que o componente mostra um rápido aumento na probabilidade condicional de falha, isto é, a sua taxa de falha instantânea $h(t)$.

Moubray (1996) ainda aponta que quando a ocorrência de desgaste do componente em função do seu tempo de operação se torna comprovada (isto é, quando o parâmetro de forma de *Weibull* estimado é maior do que 1), duas abordagens tornam-se promissoras em vista de determinar o intervalo ótimo de manutenção programada:

- Limites de vida segura
- Limites de vida econômica

Os limites de vida segura aplicam-se às falhas que possuem consequências ambientais ou de segurança, dessa forma, as atividades de manutenção devem preceder todas as falhas. Na prática, os limites de vida segura só podem ser aplicados aos modos de falha que ocorrem de tal forma que nenhuma falha pode ocorrer antes que a zona de desgaste seja atingida (NOWLAN; HEAP, 1978). Isso exige que a probabilidade condicional de falha ou função de risco $h(t)$ no limite de vida útil seja essencialmente próximo de zero. Na figura 31, Moubray (1996) exhibe o comportamento da Função de Risco Crescente FRD (ver seção 2.5.9) da curva da banheira relativa ao período de desgaste em função do tempo de operação ou idade do componente.

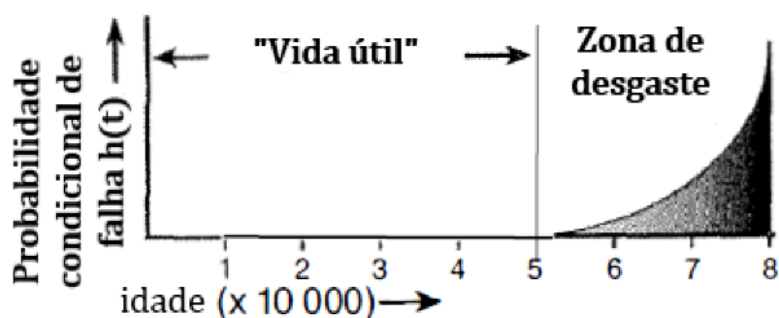


Figura 31 – Início da zona de desgaste de um componente em função da sua idade ou tempo de operação. Fonte: Modificado de Moubray (1996)

Os limites de vida econômica, por sua vez, justificam-se unicamente pela relação custo-benefício da atividade de manutenção. Em geral, de acordo com Moubray (1996), "é oportuno aplicar um limite de vida econômico se ele evitar ou reduzir as consequências operacionais de uma falha imprevista, ou se a falha que ele previne causar danos secundários significativos".

De acordo com Dutra (2019), a manutenção baseada na condição do componente (preditiva), caracteriza-se por ser a estratégia que dispõe o menor custo de reparo (ver figura 6), se comparada com a preventiva e reativa. Isso se torna possível por conta do monitoramento constante do processo de degradação da falha (oriundo do modelo preditivo) possibilitar programar a atividade de reparo ou substituição do item para um período em que os custos indiretos e induzidos da manutenção se tornam praticamente nulos, visto que estes são um subproduto do agravamento do efeito de falha. São exemplo de custos indiretos/induzidos: o lucro cessante por interrupção da produção, a depreciação de ativos, multas por danos ao meio ambiente e encargos por acidentes de trabalho (ver seção 2.4.3).

Por meio da aplicação de manutenção preditiva os custos diretos também tornam-se minimizados ao máximo, tais como: mão de obra investida, materiais e ferramentas utilizados, ou seja, tempo e dinheiro gastos.

No entanto, muito embora a estratégia de manutenção baseada na condição (preditiva) apresente um custo de reparação inferior se comparada às demais, ela também é caracterizada por apresentar um alto custo para ser implementada dentro da empresa devido a utilização de instrumentações específicas tais como tais como acelerômetro, termômetro industrial, equipamento de emissão acústica, e a constituição de um ambiente laboratorial para a realização de análises das propriedades físico-químicas de óleos, visando a execução de um monitoramento constante do desempenho da máquina e de seus componentes.

5.4.1 Programação das atividades de inspeção e substituição do componente

Visando retratar as limitações técnicas e econômicas de muitos fabricantes no Brasil de aderirem aos procedimentos e tecnologias próprias do modelo preditivo de manutenção, o presente trabalho propõe apresentar a determinação do intervalo ideal de manutenção para o retentor hidráulico de vedação a partir de uma análise da queda de seu desempenho ou confiabilidade, e seu respectivo aumento da probabilidade condicional de falha em função de sua operação.

Nesse sentido as diretrizes de Moubray (1996) no tocante à definição da frequência de manutenção para componentes que manifestam um modo de falha relacionado ao seu tempo de uso serão utilizadas, podendo ser resumidas para a seguinte premissa:

- A definição do intervalo de restauração programada é oriunda da detecção do espaço de tempo no qual a probabilidade condicional de falha seja aproximadamente zero, com tolerância a ser definida pela empresa.

A partir dos resultados das medidas de confiabilidade obtidos através do estimador da máxima verossimilhança (ver figura 30) é possível aferir o espaço de tempo para o qual a Função de Risco exibe uma taxa de falha próxima de zero. A figura 32 sugere que tal intervalo compreende o início da vida do retentor de vedação até meados dos seus 25 mil ciclos de operação. A região hachurada em amarelo exibe essa fase, e é denominada de período de vida útil.

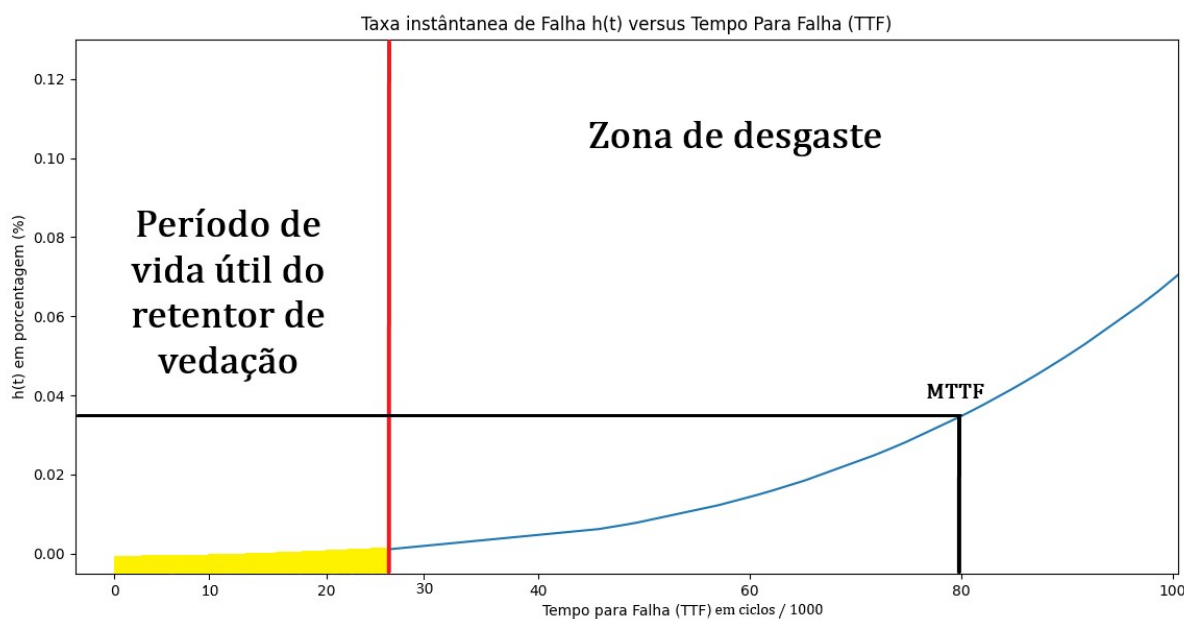


Figura 32 – Demonstração gráfica da vida útil do retentor de vedação e da sua zona de desgaste. Fonte: Modificado de Moubray (1996)

Ao considerar-se uma confiança de 95% para o resultado, a probabilidade de falha condicional ou taxa instantânea de falha para esse período está próxima de 0,1%, podendo chegar a 0,03%, de acordo com o intervalo mínimo de confiança estabelecido. O resultado para a estimativa de $h(t)$, bem como para as demais medidas de confiabilidade são apresentadas por meio da figura 33, considerando $t = 25.000$ ciclos de operação. Para essa faixa de operação, o *software* sugere uma confiabilidade de 99,42% aproximadamente para o retentor de vedação. Não obstante, a probabilidade de falha acumulada para a mesma faixa de funcionamento (25.0000 ciclos) compreende o complemento da probabilidade de sobrevivência, isto é, aproximadamente 0,58%.

```

==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*
RESULTADOS PARA AS MEDIDAS DE CONFIABILIDADE (Dist. Weibull):
(19º Iteração)

Parâmetro de forma (Beta): 3.55 < 4.09 < 4.71
Parâmetro de escala (Theta): 81439.47 < 87933.21 < 94944.73
R(25000): 98.5025% < 99.4192% < 99.8147%
F(25000): 1.4975% > 0.5808% > 0.1853%
h(25000): 0.0021 > 0.0010 > 0.0003
MTTF: 79887.32[ciclos]
==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*==*

```

Figura 33 – Resultado das principais medidas de confiabilidade para o retentor de vedação, considerando $t = 25.000$ ciclos de operação.

Fonte: Ambiente computacional elaborado pelo autor

Autores renomados do ramo da engenharia de manutenção e confiabilidade como Dutra (2019), Moubray (1996) e Nowlan e Heap (1978) propõe um cálculo para a definição da frequência das atividades de inspeção, visando auxiliar o encarregado da manutenção na detecção do ponto potencial da não conformidade para a causa de falha pretendida.

Durante a fase de inspeção, ao tratar a falha por desgaste do retentor de vedação hidráulico, o encarregado da manutenção precisa atentar-se aos diagnósticos divulgados por meio do Diagrama de Ishikawa (figura 26) e da Série de Risco (figura 27). Modos de falha como elevação da temperatura ideal de trabalho da máquina *Bodymaker*, elevação da temperatura do óleo hidráulico, aumento nos índices de vibração do eixo Ram e falta de óleo lubrificante no garfo do eixo deslizante podem ser monitorados periodicamente por meio uma formulação matemática validada empiricamente para modos de falha relacionados com a idade ou tempo de uso do componente. Nessa direção, a frequência de inspeção pode ser definida por meio da seguinte equação:

$$F_{ins} = 0,7.F_{sub} \quad (5.1)$$

onde F_{sub} refere-se a frequência de substituição do componente.

A título de exemplificação, neste trabalho será considerada como permissiva uma probabilidade condicional de falha de 0,1%, o que corresponde a 25.000 ciclos de funcionamento do retentor de vedação, com uma precisão do modelo de $\pm 20\%$, ao considerar um nível de confiança de 95% para o resultado. Todavia, vale ressaltar que fica a critério da empresa determinar a taxa de falha mais apropriada a ser utilizada como parâmetro de decisão, a depender do nível de severidade da falha em termos (i) do prejuízo à integridade física dos usuários (nível de segurança empreendido na operação), (ii) danos ao meio ambiente e (iii) dispêndios financeiros devido a geração de refugos, analisados nesta ordem de importância (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009).

Dodson e Schwab (2006) apontam, por exemplo, que na indústria da mobilidade (notadamente no contexto aeronáutico e aeroespacial) as taxas de falhas toleráveis são praticamente inexistentes, sendo aplicadas diversas redundâncias aos subsistemas de uma aeronave como estratégia de obtenção de confiabilidade operacional, além da robustez empregada para cada componente e sistema.

Na tabela 6, são exibidas as frequências de inspeção e de substituição para o retentor de vedação hidráulico, levando em consideração uma precisão do modelo matemático da ordem de $\pm 20\%$, ao assumir uma confiança de 95% para o resultado da estimativa.

Tabela 6 – Frequências de inspeção e de substituição para o componente em ciclos de operação.

Componente	Freq. de inspeção	Freq. de substituição
Retentor de vedação	$14.000 \leq F_{ins} \leq 21.000$	$20.000 \leq F_{sub} \leq 30.000$

Ao analisar os prazos sugeridos por meio da tabela 6, se faz útil chamar a atenção para o fato de que a determinação da frequência de intervenção de manutenção deve, idealmente, estar embasada sobre dois pilares, concomitantemente:

1. Constatação sensitiva ou instrumentada da inconformidade
2. Monitoramento da elevação da probabilidade condicional de falha $h(t)$

Dessa forma, se faz válido realçar que, mediante uma aplicação sistêmica do pilar 1 (constatação sensitiva ou instrumentada da falha), o prazo estabelecido para a substituição do retentor de vedação pode, eventualmente, ser atualizado para um valor ainda maior do que aquele apresentado na tabela 6, a depender das respostas obtidas por meio das práticas de inspeções realizadas. Esse mesmo raciocínio pode ser observado por meio do fluxograma apresentado pela figura 34.

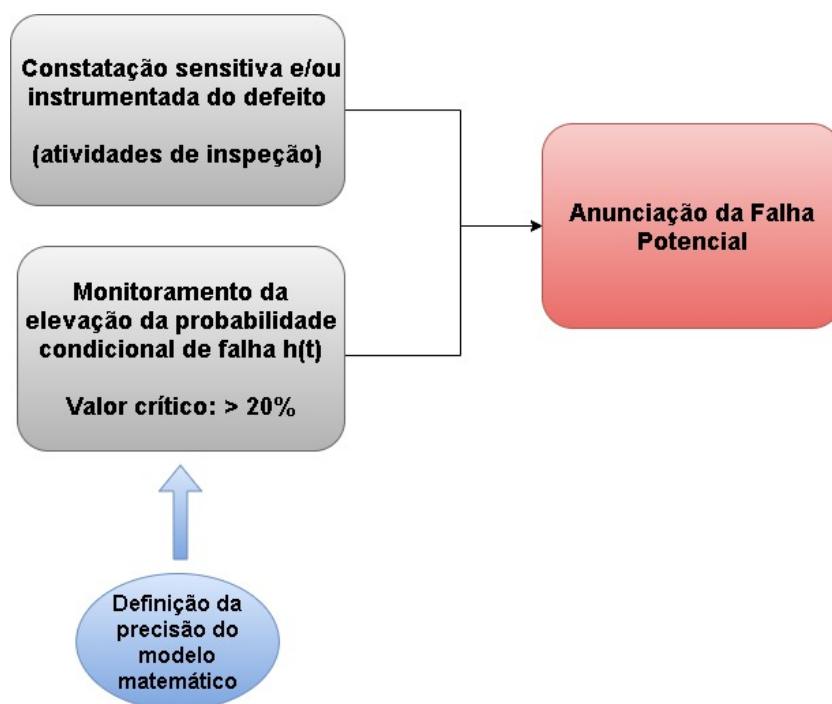


Figura 34 – Pilares a serem considerados para anunciação de uma falha potencial.
Fonte: Elaborado pelo autor

5.5 DMAIC - Controle

Em vista de verificar se a meta de substituição baseada no tempo de uso do componente de análise atende na prática a frequência determinada por este trabalho, faz-se necessário aguardar por um determinado período de tempo. Esse intervalo de espera tem por objetivo permitir a criação no histórico da empresa de registros reais de substituição do componente na frequência que fora estipulada. Por meio de uma amostra desses registros que se mostre representativa da população de dados, será possível verificar e validar a diminuição real da taxa de falha do retentor de vedação hidráulico, bem como a redução dos índices de intervenções reativas (pós-falha) de manutenção, e o consequente aumento da disponibilidade inerente da máquina *Bodymmaker*. O fluxograma exibido (figura 35) tem por objetivo auxiliar a equipe de Planejamento e Controle da Manutenção a identificar as possibilidades de ações em vista de preservar as funções do retentor de vedação, e dessa forma, garantir o máximo de disponibilidade para a máquina *Bodymaker*. O Diagrama sugere uma série de práticas a serem tomadas pelo encarregado de manutenção diante da viabilidade técnico-econômica de cada decisão considerada. De toda maneira, a manutenção pró-ativa (aquela que ocorre antes da falha) é estabelecida como modelo fundamental a ser seguido, ficando a cargo da equipe de PCM a adesão da rotina preditiva de manutenção (simbolizada na cor azul no diagrama), isto é, o monitoramento periódico dos níveis de deterioração visando a extrapolação da frequência de substituição do componente que fora determinada pela análise de confiabilidade na seção 5.3 e sugerida por

meio da tabela 6.

Diante da indisponibilidade de instrumentações específicas para a execução dos diagnósticos periódicos presentes na rotina preditiva de manutenção (tais como acelerômetro, termômetro, instrumento de emissão acústica, dentre outros), ou mediante a inviabilidade econômica do seu uso, o departamento de PCM tem a opção de aderir ao pilar de manutenção baseada no tempo ou preventiva (simbolizada na cor verde no diagrama), por meio de uma análise da confiabilidade (probabilidade condicional de falha) associada ao funcionamento do item, onde foi definida uma rotina de substituição do retentor de vedação para ocorrer a cada 25.000 ciclos de operação em média, com uma precisão de $\pm 20\%$, atendendo 95% de confiança (ver seção 5.4).

Para a elaboração do fluxograma, o valor médio dos prazos determinados para as rotinas de inspeção (F_{ins}) e substituição (F_{sub}) visando a execução da manutenção preventiva do retentor de vedação foi considerado como parâmetro de decisão a ser tomada, tendo em vista seus respectivos intervalos oriundos do erro associado à sua estimativa.

A verificação em campo da melhoria sugerida não foi possível ser empreendida por motivo das restrições impostas pela política nacional de isolamento social durante a pandemia do novo coronavírus (COVID-19) ter impedido a realização de visitas em chão de fábrica. Todavia, em outros tempos, a prática de tal verificação se faz recomendada como método de constatação se os resultados de confiabilidade empreendidos neste trabalho puderam atender na prática os requisitos técnico-econômicos da empresa.

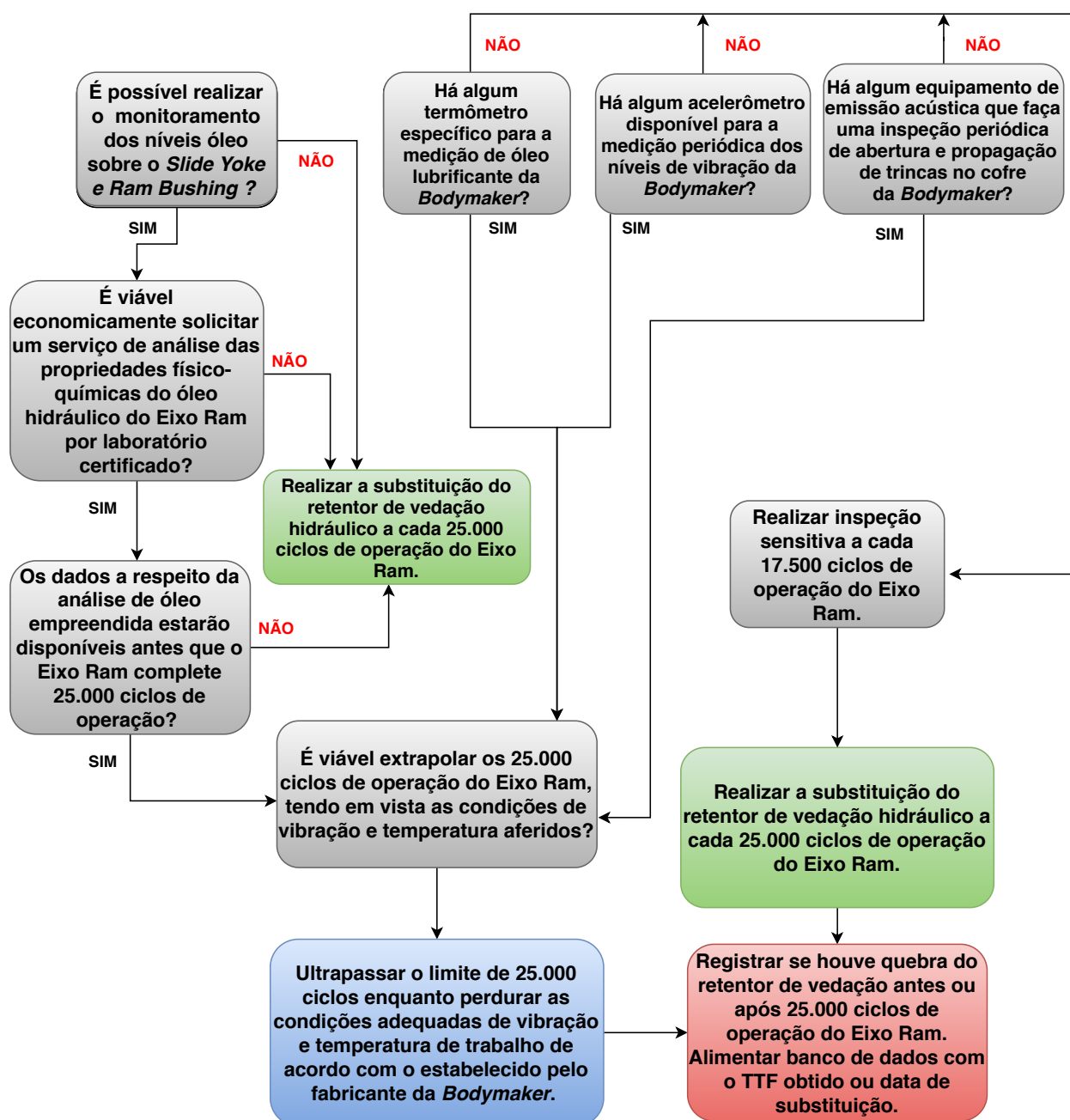


Figura 35 – Diagrama para auxiliar na tomada de decisão quando a rotina de manutenção do retentor de vedação hidráulico. Fonte: Elaborado pelo autor

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou apresentar, por meio de um levantamento bibliográfico de grandes nomes da engenharia de manutenção e confiabilidade, as principais contribuições do estudo da confiabilidade frente a cenários que permeiam o cotidiano do setor industrial, tais como: a prática da análise de falhas de componentes e sistemas e o planejamento e controle da manutenção de ativos, trazendo um enfoque para a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC).

Nessa direção, foram apresentados os principais procedimentos probabilísticos e estatísticos empreendidos na estimativa de confiabilidade de componentes industriais. Este percurso se deu por via da apresentação das principais medidas ligadas à análise de confiabilidade, bem como das distribuições de probabilidade do domínio contínuo que modelam dados de tempo até falha (TTF) mais empregadas no contexto da engenharia de manutenção. Também foi elucidado o método da máxima verossimilhança empregado na estimativa de parâmetros distribucionais de *Weibull*, propiciando a mensuração da confiabilidade associada ao funcionamento de componentes, máquinas e sistemas ao longo do seu tempo de operação.

Por meio de um estudo de caso a estratégia da hierarquização de ativos (pilar da MCC) foi praticada, onde a máquina *Bodysmaker*, seus principais conjuntos, bem como seus principais componentes, dentre eles, o retentor de vedação hidráulico (objeto do estudo de caso) foram apresentados. A abordagem visou atribuir um foco na preservação das principais funções da máquina, funções estas requeridas pelo cliente alvo da análise e apresentadas através da implementação do Desdobramento da Função Qualidade (QFD).

Ainda, o Diagrama de Ishikawa e uma Série de Riscos foram praticados como ferramentas de análise da falha, visando elucidar para o leitor quais as principais causas de falha envolvidas na análise de confiabilidade do retentor de vedação hidráulico, bem como apresentar o encadeamento lógico existente entre as não conformidades.

A metodologia de cálculo adotada na estimativa da confiabilidade para o componente analisado envolveu a randomização aleatória de dados de falha (tempo até falha) a partir de parâmetros distribucionais provenientes de um banco de dados apresentado por [Bloch e Geitner \(1997\)](#), onde o método da máxima verossimilhança aplicado à distribuição de *Weibull* foi utilizado conjuntamente com a modelagem dos Teoremas da Bissecção e de Bolzano.

Visando estabelecer uma rotina de cálculo como solução numérica para as iterações do modelo matemático, um ambiente computacional foi desenvolvido, propiciando a aferição de resultados para a estimativa dos parâmetros da distribuição escolhida, bem como

para a estimativa das medidas de confiabilidade $R(t)$, $F(t)$, $h(t)$ e MTTF, empregadas na análise do estudo de caso.

A determinação da fase de vida útil do componente analisado foi realizada com base nas diretrizes de Moubray (1996), Nowlan e Heap (1978) e Dutra (2019), fase na qual foi assumida uma probabilidade condicional de ocorrência da falha por desgaste praticamente nula. Isso propiciou aferir uma frequência de inspeção e de substituição para o retentor de vedação hidráulico de 17.500 ciclos e 25.000 ciclos de operação em média, respectivamente, podendo variar em $\pm 20\%$, com 95% de confiança para a previsão. É válido reiterar que a frequência de substituição do retentor de vedação pode transcender a predição matemática, a depender dos resultados de inspeção obtidos para o componente por meio da aplicação de técnicas de manutenção preditiva.

Não obstante, uma rotina de monitoramento do desempenho dos processos de manutenção para o retentor de vedação foi elaborada, onde, por meio de um diagrama de decisão, a equipe responsável pelo planejamento e controle das atividades de manutenção (PCM) poderá ser auxiliada a seguir os procedimentos e prazos determinados por intermédio da análise de confiabilidade empreendida por este trabalho.

A adoção de tais práticas objetiva atingir uma diminuição da taxa de falha do retentor de vedação hidráulico para 0,1% em média (ficando este valor a ser determinado na prática pela empresa), bem como propende a reduzir os índices de manutenção reativa (que ocorre após o surgimento da não-conformidade), elevando conseqüentemente a disponibilidade inerente da máquina *Bodymaker* e, dessa forma, a disponibilidade da linha produtiva.

Por meio da utilização de ferramentas de engenharia de confiabilidade, a caracterização da falha do componente industrial objeto do estudo de caso (retentor de vedação hidráulico) foi realizada, o que possibilita caracterizar o custo operacional das atividades de manutenção preventiva e preditiva em trabalhos futuros.

Referências

- AHMED, J. U. Modern approaches to product reliability improvement. *International Journal of Quality & Reliability Management*, MCB UP Ltd, v. 13, n. 3, p. 27–41, 1996. Citado na página 16.
- ALCARAZ, J. L. G. et al. *Lean manufacturing in the developing world*. [S.l.]: Springer, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 27.
- ASIA, H. *Retentor de vedação hidráulico da máquina Bodymaker.*, howpublished = <<http://hammillasia.com/>>, note = Acessado: 14/10/2019, year = 2018. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 78.
- BIROLINI, A. *Reliability engineering*. [S.l.: s.n.], 2017. 3,16 p. Citado 5 vezes nas páginas 20, 21, 36, 59 e 65.
- BLISCHKE, W. R.; MURTHY, D. P. *Reliability: modeling, prediction, and optimization*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 767. Citado na página 59.
- BLOCH, H. P.; GEITNER, F. K. *Practical Machinery Management for Process Plants: Volume 2: Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. [S.l.]: Elsevier, 1997. Citado 9 vezes nas páginas 9, 19, 65, 66, 85, 86, 88, 89 e 99.
- BRAGLIA, M.; FANTONI, G.; FROSOLINI, M. *The house of reliability*, 2006. 2006. Citado na página 16.
- CAMPOS, V. F. Tqc: controle da qualidade total. *Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni*, v. 11, 1992. Citado na página 23.
- CHAN, L.-K.; WU, M.-L. Quality function deployment: A literature review. *European journal of operational research*, Elsevier, v. 143, n. 3, p. 463–497, 2002. Citado na página 37.
- DODSON, B.; SCHWAB, H. *Accelerated testing*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 400. Citado 23 vezes nas páginas 8, 17, 42, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 65, 74, 85, 87 e 95.
- DÜPOW, H.; BLOUNT, G. A review of reliability prediction. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, MCB UP Ltd, v. 69, n. 4, p. 356–362, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 38.
- DUTRA, J. T. *Planejamento e Controle da Manutenção Descomplicado*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1. 4–17 p. Citado 25 vezes nas páginas 8, 17, 18, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 37, 38, 39, 40, 41, 51, 52, 66, 91, 92, 94 e 100.
- EDMONDSON, A. C. Strategies for learning from failure. *Harvard business review*, v. 89, n. 4, p. 48–55, 2011. Citado na página 21.
- FARIA, A. C. de; VIEIRA, V. S.; PERETTI, L. C. Redução de custos sob a ótica da manufatura enxuta em empresa de autopeças. *Revista Gestão Industrial*, v. 8, n. 2, 2012. Citado na página 23.

- FERNANDES, C. G. Metodologia para melhorar a confiabilidade de subsistemas através de análise de falhas e testes acelerados. 2010. Citado 5 vezes nas páginas 15, 17, 21, 23 e 38.
- FILHO, G. B. Indicadores e índices de manutenção. *Rio de Janeiro: Ciência Moderna*, v. 148, p. 4–17, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 16, 33, 34 e 37.
- FOGLIATO, F.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e manutenção industrial*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2009. Citado 28 vezes nas páginas 8, 16, 17, 20, 21, 23, 24, 25, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 47, 48, 49, 50, 51, 56, 59, 60, 61, 63, 91 e 95.
- GEORGE, M. *Lean Six Sigma for Service: How to Use Lean Speed and Six Sigma Quality to Improve Services and Transactions*. 1. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2003. ISBN 9780071418218,0071418210. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 63.
- GUIMARÃES, U. V. Modelagem para análise da confiabilidade de produtos em garantia. 2002. Citado na página 20.
- GWIAZDA, A. et al. Quality tools in a process of technical project management. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Citeseer, v. 18, n. 1-2, p. 439–442, 2006. Citado na página 23.
- IPS. *Bodymaker machine components*. 2018. <<https://intpacsol.com/can-school/attachment/standun-bodymaker-diagram/>>. Acessado: 15/10/2019. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 77.
- ISHIKAWA, K. *Guide to quality control*. [S.l.: s.n.], 1982. Citado na página 23.
- LEEMIS, L. Reliability: Probability models and statistica. *Methods, Prentice-Hall, London*, p. 147–149, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 41.
- LEVITT, J. Maintenance management. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, Wiley Online Library, p. 1–16, 2000. Citado na página 26.
- MARCORIN, W. R.; LIMA, C. R. C. Análise dos custos de manutenção e de não-manutenção de equipamentos produtivos. *Revista de ciência & tecnologia*, v. 11, n. 22, p. 35–42, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- MARR, B. *Key Performance Indicators (KPI): The 75 measures every manager needs to know*. [S.l.]: Pearson UK, 2012. Citado na página 34.
- MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. *Production*, SciELO Brasil, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007. Citado na página 19.
- MONTGOMERY, G. C. R. D. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 7th. ed. Wiley, 2018. ISBN 1119409535. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=57ca3651c10165f7b64ff0dadf4d4f10>>. Citado 11 vezes nas páginas 8, 36, 38, 41, 42, 43, 44, 53, 56, 57 e 58.
- MOUBRAY, J. *Introdução à manutenção centrada na confiabilidade*. [S.l.: s.n.], 1996. 129 p. Citado 16 vezes nas páginas 9, 16, 17, 18, 26, 30, 31, 33, 36, 79, 85, 91, 92, 93, 94 e 100.

- NELSON, W. B. *Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. v. 344. Citado 6 vezes nas páginas 42, 52, 53, 56, 60 e 61.
- NOWLAN, F. S.; HEAP, H. F. *Reliability-centered maintenance*. [S.l.], 1978. Citado 3 vezes nas páginas 91, 94 e 100.
- O'CONNOR, P.; KLEYNER, A. *Practical reliability engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. Citado na página 20.
- PINHEIRO, J. et al. *Probabilidade e estatística: quantificando a incerteza*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 8, 10, 42, 43, 44 e 46.
- PYZDEK, T. *The six sigma project planner*. [S.l.]: McGraw-Hill,, 2003. Citado na página 63.
- RAUSAND, M. Reliability centered maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier, v. 60, n. 2, p. 121–132, 1998. Citado na página 31.
- SAMOHYL, R. W. *Controle estatístico de qualidade*. [S.l.]: Elsevier, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 38.
- SCATOLIN, A. C. et al. Aplicação da metodologia seis sigma na redução das perdas de um processo de manufatura. [sn], 2005. Citado na página 63.
- SHANKAR, R. *Process improvement using six sigma: a DMAIC guide*. [S.l.]: Quality Press, 2009. Citado na página 63.
- SINGH, R. et al. Total productive maintenance (tpm) implementation in a machine shop: A case study. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 51, p. 592–599, 2013. Citado na página 27.
- SMITH, D. J. *Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers*. 9th edition. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2017. Citado 8 vezes nas páginas 8, 20, 21, 22, 25, 31, 36 e 41.
- SOUZA, C. R. C. d. Análise e gerenciamento de riscos de processos industriais. *Rio de Janeiro, sd Disponível em:* <<http://www.areaseg.com/bib/12>>, 2000. Citado na página 24.
- SOUZA, R. A. d. et al. Confiabilidade e falhas de campo: uma metodologia para suporte ao projeto. Florianópolis, SC, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.
- TAYLOR, C. *Ball and roller bearings theory, design and application: P. Eschmann, L. Hasbargen and K. Weigand; published by John Wiley, Chichester, Sussex, 1985; 492 pp.; price, £ 32.50; ISBN 0-47-126283-8*. [S.l.]: Elsevier, 1986. Citado na página 28.
- UNIÃO, D. O. D. *Lei Nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018*. 2018. <http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/54522378/do1-2018-12-11-lei-no-13-755-de-10-de-dezembro-de-2018-54522208>. Acessado: 09/11/2019. Citado na página 15.
- VIANA, H. R. G. *PCM-Planejamento e Controle da manutenção*. [S.l.]: Qualitymark Editora Ltda, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.

WERKEMA, C. *Ferramentas Estatísticas Básicas do Lean Seis Sigma Integradas: PDCA e DMAIC*. [S.l.]: Elsevier, 2016. Citado na página 21.

XENOS, H. G. Gerenciando a manutenção produtiva. *Belo Horizonte: Editora de desenvolvimento gerencial*, v. 171, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

YIN, R. K. *Case study research and applications: Design and methods*. [S.l.]: Sage publications, 2017. Citado na página 19.