

UNIVERSIDADE DE ARARAQUARA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Denis Komninakis

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE PARA FORMULAÇÃO DE
ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS EM UMA
EMPRESA DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade de Araraquara – UNIARA – como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

Prof. Dr. Cláudio Luis Piratelli
Orientador
Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar
Co-orientador

Araraquara, SP – Brasil
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

K85a Komninakis, Denis
Análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia/Denis Komninakis. – Araraquara: Universidade de Araraquara, 2017.
95f.

Dissertação (Mestrado)- Mestrado Profissional em Engenharia de Produção – Universidade de Araraquara-UNIARA

Orientador: Prof. Dr. Claudio Luís Piratelli/Prof. Dr. Jorge A. Achcar

1. Análise de confiabilidade. 2. Estratégia de manutenção.
3. Disponibilidade. 4. Indústria alimentícia. I. Título.

CDU 62-1

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

KOMNINAKIS, D. **Análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia.** 2017. 95f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade de Araraquara, Araraquara-SP.

ATESTADO DE AUTORIA E CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Denis Komninakis

TÍTULO DO TRABALHO: análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2017

Conforme LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998, o autor declara ser integralmente responsável pelo conteúdo desta dissertação e concede à Universidade de Araraquara permissão para reproduzi-la, bem como emprestá-la ou ainda vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a sua autorização.



Denis Komninakis

Universidade de Araraquara – UNIARA

Rua Carlos Gomes, 1217, Centro. CEP: 14801–340, Araraquara-SP

Email: denis_komninakis@yahoo.com.br



UNIVERSIDADE DE ARARAQUARA - UNIARA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade de Araraquara – UNIARA – para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

NOME DO AUTOR: **DENIS KOMNINAKIS DINIZ**

TÍTULO DO TRABALHO:

"ANÁLISE DE CONFIABILIDADE PARA FORMULAÇÃO DE ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS EM UMA EMPRESA DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA."

Assinatura do(a) Examinador(a)

Conceito

Prof(a). Dr(a). Jorge Alberto Achcar (Co-orientador(a))
Universidade de Araraquara - UNIARA

Aprovado () Reprovado

Prof(a). Dr(a). José Luis Garcia Hermosilla
Universidade de Araraquara - UNIARA

Aprovado () Reprovado

Prof(a). Dr(a). Daiane Leite da Roza
Universidade de São Paulo - USP

Aprovado () Reprovado

Versão definitiva revisada pelo(a) Co-orientador(a) em: 12/08/2017

Prof(a). Dr(a). Jorge Alberto Achcar (Co-orientador(a))

À Deus por permitir que eu chegasse até aqui. À minha esposa Elaine e ao meu filho Nicholas
pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao Itaú Unibanco pelo apoio financeiro e flexibilização de minha jornada de trabalho, permitindo que este desafio fosse possível de se realizar.

Aos professores Dr. Cláudio Luis Piratelli e Dr. Jorge Alberto Achcar, meu orientador e co-orientador respectivamente, por todo o suporte e orientação ao longo destes 24 meses.

Aos colegas e docentes do Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da UNIARA.

À Luciana Paula Oliveira, secretária do mestrado, pela ajuda e suporte ao longo do tempo.

Aos amigos da “Mesa 17” pelos momentos de convívio, alegria e trabalho em equipe.

À minha família pelo apoio incondicional.

Em especial ao amigo Vlamir Faria Barriento, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

Epígrafe
“Pense Grande, Comece Pequeno, Seja Rápido”
Fábio Barbosa – Presidente do Grupo Abril

RESUMO

Atualmente a função manutenção passou a ter um importante papel na busca por vantagens competitivas das empresas. Nesse sentido a análise de confiabilidade de equipamentos é parte fundamental para a definição de estratégias de manutenção mais adequadas. Desta forma, o objetivo deste trabalho é aplicar a análise de confiabilidade para identificar a coerência da atual estratégia de manutenção de equipamentos empregada em uma empresa da indústria alimentícia localizada no interior do Estado de São Paulo. O método de pesquisa utilizado foi a modelagem estatística aplicada ao tempo de reparo (TTR) e tempo entre falhas (TBF) de um conjunto de 6 máquinas de embalagem localizadas em uma das linhas de produção da empresa. Estes tempos foram modelados por distribuições de probabilidade Log-normal e Weibull. Os resultados apontam que a atual estratégia de manutenção preventiva adotada para os equipamentos não está adequada, pois de acordo com a pesquisa estes equipamentos se encontram na fase de mortalidade infantil no ciclo de sua vida útil, o que sugere o emprego da estratégia de manutenção corretiva com o objetivo de se identificar e eliminar as falhas de origem.

Palavras-chave: Análise de Confiabilidade. Estratégia de Manutenção. Disponibilidade. Indústria Alimentícia.

ABSTRACT

Currently the maintenance function now has an important role in the search for competitive advantages of companies. In this sense, the equipment reliability analysis is a fundamental part in defining the most appropriate maintenance strategies. Thus, the objective of this work is to apply the reliability analysis to identify the coherence of the current equipment maintenance strategy employed in a Brazilian food industry company located in the Estado de São Paulo state. The research method used was the statistical modeling applied to the time to repair (TTR) and time between failures (TBF) of a set of 6 packaging machines located in one of the company's production lines. These times were modeled by distributions Log-normal and Weibull probability. The results indicate that the current preventive maintenance strategy adopted for the equipment is not appropriate, since according to the research these equipments are in the infant mortality phase in the cycle of its useful life, which suggests the use of corrective maintenance strategy with the objective of identifying and eliminating the origin faults.

Key-words: *Reliability Analysis. Maintenance Strategy. Availability. Food Industry.*

Lista de Figuras

Figura 1 – Processo da RCM e seus resultados, segundo Brauer, D. e Brauer, G. (1987).....	33
Figura 2 – Processo da RCM e seus resultados, segundo Rausand (1998)	33
Figura 3 – Processo da RCM e seus resultados, segundo Carretero et al. (2003)	34
Figura 4 – Tipos de curvas de falhas	39
Figura 5 – Distribuição de frequência de falhas por linha de produção (período: jan/14 a mai/16).....	74
Figura 6 – Distribuição de frequência de falhas por equipamento – Linha 07 (período: jan/14 a mai/16).....	75
Figura 7 – Análise gráfica da aderência para o TTR – Máquina 1.....	76
Figura 8 – Análise gráfica da aderência para o TTR – Máquina 2.....	76
Figura 9 – Análise gráfica da aderência para o TTR – Máquina 3.....	77
Figura 10 – Análise gráfica da aderência para o TTR – Máquina 4.....	77
Figura 11 – Análise gráfica da aderência para o TTR – Máquina 5.....	77
Figura 12 – Análise gráfica da aderência para o TTR – Máquina 6.....	78
Figura 13 – Análise gráfica da aderência para o TBF – Máquina 1	79
Figura 14 – Análise gráfica da aderência para o TBF – Máquina 2.....	79
Figura 15 – Análise gráfica da aderência para o TBF – Máquina 3.....	79
Figura 16 – Análise gráfica da aderência para o TBF – Máquina 4.....	80
Figura 17 – Análise gráfica da aderência para o TBF – Máquina 5.....	80
Figura 18 – Análise gráfica da aderência para o TBF – Máquina 6.....	80
Figura 19 – Função Manutenibilidade – TTR	82
Figura 20 – Função Confiabilidade – TBF.....	83
Figura 21 – Função Taxa de Falha – TBF	83
Figura 22 – Posição das máquinas na curva da banheira	88
Figura 23 – Boxplot – tempo de reparo – TTR	89
Figura 24 – Boxplot – tempo entre falhas – TBF.....	90
Figura 25 – Histograma – tempo de reparo – TTR	91
Figura 26 – Histograma – tempo entre falhas – TBF	91

Lista de Quadros

Quadro 1 – Relação entre as fases do ciclo de vida da curva da banheira e estratégias de manutenção.....	41
Quadro 2 – Seleção da distribuição com melhor ajuste – TTR.....	78
Quadro 3 – Seleção da distribuição com melhor ajuste – TBF.....	81
Quadro 4 – Equações e cálculos da análise de confiabilidade e disponibilidade.....	85

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Convenções utilizadas para os parâmetros de forma e escala da distribuição de Weibull encontradas na literatura	52
Tabela 2 – Estatísticas descritivas e EMV dos parâmetros do modelo de TTR – Modelo Log-normal	82
Tabela 3 – Estatísticas descritivas e EMV dos parâmetros do modelo de TBF – Modelo Weibull	83
Tabela 4 – Disponibilidade das Máquinas.....	84

Lista de Abreviaturas e Siglas

Av – Availability (Disponibilidade).

BDTD – Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações.

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

CBM – Condition-Based Maintenance.

CDM – Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade.

CM – Corrective Maintenance.

CV – Coeficiente de Variação.

DOAJ – Directory Of Open Access Journals.

DP – Desvio Padrão.

IC – Índice de Confiança.

MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade.

MCR – Manutenção Centrada no Reparo.

MTBF – Mean Time Between Failure.

MTTF – Mean Time To Failure.

PM – Preventive Maintenance.

RCM – Reliability Centered Maintenance.

SBU – Sistema de Bibliotecas da Universidade de Campinas - Unicamp.

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade de São Paulo – USP.

USP – Universidade de São Paulo.

UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

TBF – Time Between Failure.

TPM – Total Productive Maintenance.

TQMain – Total Quality Maintenance.

TTR – Time To Repair.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	viii
Lista de Quadros.....	ix
Lista de Tabelas	x
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Questão da Pesquisa	17
1.2 Objetivo da Pesquisa	17
1.2.1 Objetivos Específicos	17
1.3 Justificativas	18
1.4 Metodologia Adotada	19
1.5 Estrutura da Pesquisa.....	19
2 FUNDAMENTOS DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL	21
2.1 Políticas e Tipos de Manutenção	24
2.1.1 Tipos de Manutenção.....	25
2.2 Engenharia de Manutenção	29
2.3 Manutenção Centrada na Confiabilidade	30
3 FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	42
3.1 Conceito de Confiabilidade	42
3.1.1 A Função de Confiabilidade	43
3.1.2 Tempo Médio e Vida Média Residual.....	46
3.1.3 Tipos de Dados na Análise de Confiabilidade.....	47
3.1.4 Modelos de Confiabilidade.....	48
3.1.5 Estimacão dos Parâmetros dos Modelos	55
4 ESTUDO DA CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E DISPONIBILIDADE NA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL	59
5 MÉTODO CIENTÍFICO.....	65
5.1 Tipos de Pesquisa	65
5.2 Procedimentos Operacionais	68
6 MODELAGEM ESTATÍSTICA DA CONFIABILIDADE	71
6.1 Caracterização da Empresa.....	72
6.2 Definição da Amostra.....	73
6.3 Construção do Modelo de Análise de Confiabilidade.....	75
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA MODELAGEM.....	85
7.1 Discussão.....	88
7.2 Comparação da Estratégia Atual vs. Estratégia Indicada Pela Pesquisa	93

8	CONCLUSÕES.....	96
8.1	Trabalhos futuros.....	97
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

A concorrência empresarial não é uma questão nova, específica do momento atual, ela sempre esteve presente no mundo dos negócios, contudo, a globalização colocou o enfoque da concorrência e da competitividade em um elevado grau de importância (PADOVEZE, 2007).

Para Vaccaro (1997), a busca por “vantagens competitivas” tem sido uma das mais importantes metas administrativas e gerenciais de empresas por todo o mundo.

Vantagem competitiva é a capacidade da empresa de apresentar um desempenho diferenciado na implementação ou melhoria de qualquer característica em produtos, processos e serviços que possa garantir alguma vantagem sobre empresas concorrentes (KOTLER; KELLER, 2006; VACCARO, 1997). Na busca pela competitividade empresarial, a gestão da manutenção tem se mostrado um fator extremamente relevante, visto que a produtividade está diretamente relacionada à redução dos custos e pode propiciar aumento do faturamento, melhorias na confiabilidade e, disponibilidade dos equipamentos produtivos, podem contribuir significativamente para aumentar a competitividade das organizações (SELLITTO; BORCHARDT; ARAUJO, 2002; SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007).

Segundo Fraser, Hvolby e Tseng, (2015), historicamente as empresas enxergam a função manutenção e os custos associados, como um “mal necessário”. Entretanto, este sentimento negativo vem sendo, progressivamente, substituído por uma visão que reconhece que a confiabilidade e a manutenção evoluíram para uma importância crítica para o sucesso de longo prazo das organizações.

Dado o aumento do número de equipamentos automatizados, o que torna os processos produtivos mais complexos, paradas ou perda de capacidade de equipamentos podem significar perdas importantes e de difícil recuperação, exigindo mais articulação entre a estratégia de manutenção e a produção (RAMOS FILHO; ATAMANCZUK; MARÇAL, 2010; SANTOS; SELLITTO, 2016).

Na indústria alimentícia isso não é diferente, porque quando uma falha inesperada ocorre, o equipamento em falha para e força a maior parte da linha à frente da falha a operar sem material, causando um *gap* na linha produção, além disso, se a parada for suficientemente longa, pode causar um *gap* adicional, uma vez que o material (bruto, intermediário ou produto final) antes da falha, pode vir a ser descartado devido a deterioração da qualidade durante a parada (TSAROUHAS, 2012).

Em função da manutenção ser, tradicionalmente, planejada a partir da experiência dos funcionários envolvidos, orientados pelos manuais dos fabricantes, corre-se o risco destas

recomendações não serem baseadas em dados reais, pois, a fim de maximizar a venda de componentes ou minimizar responsabilidades, alguns fabricantes orientam intervalos curtos de revisão e substituição de partes e componentes (MENDES; RIBEIRO, 2011; RAUSAND, 1998).

Deste modo, para Ferrero, Tarrés e Losilla (2002), a otimização da política de manutenção requer uma combinação balanceada entre manutenções preventivas, preditivas e corretivas, sendo que o tipo de manutenção e o intervalo entre manutenções de cada item depende do comportamento de sua taxa de falhas e do custo de cada falha.

Nesse sentido, o grande desafio para o planejamento da manutenção é a definição de quando e que tipo de intervenção deve ser feita em determinado equipamento (MENDES; RIBEIRO, 2014).

A elaboração de planos de manutenção baseados em análises quantitativas é essencial para a compreensão do tipo e do intervalo de manutenção mais adequado ao comportamento da taxa de falhas de cada equipamento, permitindo assim, formular a melhor estratégia de manutenção para cada equipamento, evitando a execução de atividades desnecessárias ou ineficazes de manutenção, agregando atividades que, de fato, contribuem para o aumento da disponibilidade dos equipamentos e redução dos custos da empresa (MENDES; RIBEIRO, 2014; SANTOS; SELLITTO, 2016). Nesse sentido, Sellitto (2005, 2007) define, a partir de funções de confiabilidade, estratégias de manutenção em indústrias metal-mecânica baseadas no comportamento da taxa de falhas dos equipamentos, utilizando a curva da banheira como uma forma genérica de visualização gráfica da função taxa de falha que identifica o ciclo de vida de um item: mortalidade infantil, maturidade e fase de desgaste (KLUTKE; KIESSLER; WORTMAN, 2003).

No entanto, alguns autores justificam o uso de abordagens apenas qualitativas devido à falta de dados históricos e métodos estatísticos adequados para interpretar estes dados e que artigos sobre otimização da manutenção são escritos por pesquisadores matemáticos ou estatísticos que utilizam linguagem e modelos de complexidade muito além do aceitável na prática de manutenção (SRIKRISHNA; YADAVA; RAO, 1996; RAUSAND, 1998).

Para Sellitto, Borchardt e Araújo (2002), o rigor dos modelos desestimula os profissionais de manutenção, habituados principalmente a ações de campo de curto prazo. Não faz parte da realidade de muitas empresas o uso de modelos de longa maturação para o planejamento da manutenção, sendo a organização das bases de dados voltadas para os objetivos vigentes.

Com uma visão mais moderada, Mendes e Ribeiro (2014) ressaltam que questões tanto qualitativas quanto quantitativas devem ser consideradas na definição da estratégia de manutenção.

Como método que pode contribuir para a definição de estratégias de manutenção que aumentem a confiabilidade e a disponibilidade de equipamentos, Sellitto (2007) sugere o uso da metodologia RCM (*Reliability-Centered-Maintenance* – Manutenção Centrada na Confiabilidade). Por meio de análise quali-quantitativa de falhas, a RCM é capaz de reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas e também dos custos de manutenção pela substituição de atividades preventivas de alto custo por procedimentos mais adequados e de menor custo, sendo necessário para isso, o entendimento do contexto operacional no qual o equipamento se encontra, razão pela qual equipamentos idênticos podem demandar diferentes tarefas de manutenção segundo o contexto (PEREIRA, 2009 apud DIEDRICH; SELLITTO, 2014).

A RCM se divide em duas abordagens: 1) qualitativa, baseada principalmente na Análise do Modo de Falhas, Efeitos e Criticidade (FMECA – *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) e na Análise de Árvore de Falhas (FTA – *Fault Tree Analysis*); 2) quantitativa, baseada principalmente na modelagem de tempos entre falhas e tempos de reparo (MENDES; RIBEIRO, 2014).

De modo geral, a literatura sobre a RCM tem abordado mais aspectos qualitativos do que quantitativos, porém, Mendes (2011) sugere que as técnicas quantitativas são as que podem contribuir mais efetivamente para o aumento da confiabilidade dos sistemas de produção.

Esta pesquisa terá como foco apenas a abordagem quantitativa da modelagem de tempos entre falhas e tempos de reparo dos equipamentos de uma empresa da indústria alimentícia.

Diante do exposto é possível afirmar que a gestão da manutenção, confiabilidade e disponibilidade de equipamentos exercem um papel importante no sucesso das empresas para o aumento da eficiência e produtividade da linha de produção.

No entanto, determinar uma abordagem ótima para redução de gastos financeiros e custo total do ciclo de vida de equipamentos não é uma tarefa fácil enfrentada pelo planejamento da manutenção (HORNER; EL-HARAM; MUNNS, 1997; CARVALHO, 2012).

Assim, o que se busca com a definição de estratégias de manutenção são métodos gerenciais com o objetivo de equilibrar a complexidade das organizações dotadas de

modernas tecnologias com as ações requeridas para administrá-las com cada vez mais confiabilidade, garantindo uma performance livre de falhas (DIAS, 2010; VACCARO, 1997).

1.1 Questão da Pesquisa

A empresa objeto de estudo tem atualmente definida uma estratégia de manutenção preventiva com paradas mensais para todos os equipamentos produtivos.

Sendo importante haver um equilíbrio entre políticas de manutenção preventiva, preditiva e corretiva condicionado ao comportamento da taxa de falhas e do custo de falhas de cada equipamento (FARRERO; TARRÉS; LOSILLA, 2002) e, sendo a análise quantitativa essencial para a compreensão do comportamento da taxa de falhas, auxiliando na difícil tarefa de formulação de melhores estratégias de manutenção para cada equipamento que contribua para o aumento da disponibilidade e redução dos custos da empresa (CARVALHO, 2012; HORNER; EL-HARAM; MUNNS, 1997; MENDES; RIBEIRO, 2014; SANTOS; SELLITTO, 2016), coloca-se como problema de pesquisa a seguinte questão:

A partir dos trabalhos de Sellitto (2005, 2007) e Mengue e Sellitto (2013), a estratégia de manutenção atual da empresa objeto de estudo é a mais adequada para seus equipamentos produtivos?

1.2 Objetivo da Pesquisa

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a coerência da atual estratégia de manutenção para os equipamentos produtivos de uma empresa da indústria alimentícia por meio do uso de funções de confiabilidade.

1.2.1 Objetivos Específicos

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- 1) Calcular as funções de confiabilidade (modelamento do tempo entre falhas – TBF) e manutenibilidade (modelamento do tempo de reparo – TTR) dos equipamentos usados exclusivamente no processo produtivo;
- 2) Calcular a disponibilidade dos equipamentos estudados;
- 3) Posicionar os equipamentos na curva do ciclo de vida útil (curva da banheira);
- 4) Comparar a estratégia de manutenção atual com a modelagem e eventualmente sugerir melhorias.

1.3 Justificativas

A incorporação de novas funcionalidades e complexidade das operações e equipamentos incorporados aos sistemas de produção, tem exigido cada vez mais confiabilidade, manutenibilidade e segurança dos processos produtivos (RAPOSO, 2011).

De acordo com Liberopoulos e Tsarouhas (2005), uma importante preocupação gerencial na operação de linhas de produção de pães e produtos de panificação, é manter a produção funcionando com o mínimo de interrupções. Pode-se estender este argumento também para a linha de produção da empresa em estudo, pois ela apresenta processo produtivo bastante similar.

Para manter as características de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade e alcançar a performance esperada, uma efetiva estratégia de manutenção deve ser empregada para os equipamentos (BARABADY; KUMAR, 2008), pois, equipamentos operando fora de suas condições ótimas podem gerar perdas irre recuperáveis para empresas inseridas em mercados competitivos. Em muitos casos, o custo relacionado a perdas são decorrentes de falhas no planejamento ou execução da manutenção industrial e repercutem na confiabilidade do processo produtivo, afetando a competitividade do negócio (MENGUE; SELLITTO, 2013).

Como tais equipamentos demandam elevados investimentos, sua utilização deve ser maximizada para maximizar o retorno financeiro das empresas (RAPOSO, 2011).

Neste contexto, é importante que as empresas sejam capazes de definir estratégias de manutenção que garantam confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos com custo-benefício adequados, afim de minimizar o risco e o impacto das falhas no processo produtivo e, conseqüentemente, na competitividade do negócio.

Apesar de técnicas de análise de confiabilidade serem conhecidas e empregadas em projeto de produtos, o mesmo não ocorre, na mesma intensidade, na manutenção industrial (SELLITTO; BARCHARDT; ARAÚJO, 2002).

A motivação de pesquisas de metodologias baseadas em confiabilidade aplicadas à manutenção industrial vem sendo incentivada muito em razão das aplicações da análise de confiabilidade já verificadas na manutenção industrial terem introduzido nas empresas algumas práticas desejáveis, como a integração da operação e da manutenção, necessária para a correta modelagem e, o uso da manutenção como alternativa estratégica, ao aumentar a capacidade de oferecer produtos e serviços diferenciados ao mesmo tempo em que reduz

custos de mão-de-obra e materiais pela otimização das intervenções (SELLITTO; BARCHARDT; ARAÚJO, 2002).

1.4 Metodologia Adotada

A pesquisa é de natureza aplicada, pois os resultados serão aplicados na solução de problemas concretos (CERVO; BERVIAN, 2002; MARCONI; LAKATOS, 2002).

Quanto ao tipo, a pesquisa será descritiva, objetivando descobrir a frequência com que as falhas nos equipamentos ocorrem, sua natureza e características, de forma a identificar se a atual estratégia de manutenção empregada está adequada.

Para Cervo e Bervian (2002), o objetivo da pesquisa descritiva é observar, registrar, analisar e correlacionar fatos ou fenômenos (variáveis) sem manipulá-los.

Do ponto de vista da abordagem, a pesquisa será quantitativa e como método, utilizará a modelagem estatística com o objetivo calcular a confiabilidade de equipamentos através do modelamento dos tempos entre falhas – TBF e tempos de reparo – TTR dos equipamentos de uma empresa da indústria alimentícia utilizados exclusivamente na produção.

A pesquisa quantitativa enfatiza a objetividade e a análise de dados, de forma que o subjetivismo não influencie na compreensão dos fatos. A modelagem utiliza técnicas matemáticas e estatísticas para descrever o funcionamento de um sistema, criando modelos que permitam melhor compreensão do ambiente, identificação de problemas e definição de estratégias para tomada de decisões (CAUCHICK MIGUEL, 2012).

A coleta de dados será realizada com a extração dos dados de tempos de reparo e tempos entre falhas disponíveis no sistema de gestão e banco de dados da empresa foco do estudo.

1.5 Estrutura da Pesquisa

Esta dissertação está organizada em 8 seções, sendo a primeira constituída desta introdução.

Na Seção 2 pode ser encontrada uma descrição das políticas e tipos de manutenção existentes que mais se destacam na literatura, apontando vantagens e desvantagens da adoção de cada uma.

A Seção 3 apresenta alguns conceitos e fundamentos de Confiabilidade. Essencialmente, são abordados conceitos relacionados com este tema que, de alguma forma,

estão associados aos objetivos do trabalho, como, por exemplo, as funções de confiabilidade e modelos mais utilizados.

Na Seção 4 é apresentada a revisão da literatura com algumas aplicações da análise de confiabilidade na engenharia de manutenção.

A Seção 5 apresenta a abordagem metodológica e classificação da pesquisa quanto ao método científico.

Na Seção 6 é apresentada a caracterização da empresa, a definição da amostra e o desenvolvimento da modelagem da análise de confiabilidade aplicada ao conjunto das 6 máquinas de embalagem da linha 07 de produção.

Tendo como base as Seções 2, 3 e 6, na Seção 7 discute-se os resultados da modelagem de confiabilidade e como estes podem ser utilizados na gestão da manutenção dos equipamentos estudados. Compara-se, ainda, a estratégia de manutenção sugerida com base na modelagem da confiabilidade com a estratégia de manutenção atualmente empregada pela empresa.

Por fim, a Seção 8 apresenta as principais conclusões deste trabalho, delineando algumas perspectivas e sugestões de investigação futuras.

2 FUNDAMENTOS DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

De acordo com Kardec e Nascif (2009), a atividade de manutenção tem passado por grandes mudanças, muito em consequência do aumento rápido do número e diversidade de itens físicos que devem ser mantidos, elevação de projetos cada vez mais complexos, surgimento de novas técnicas de manutenção, novo enfoque sobre a organização, escopo e responsabilidade da manutenção e a visão da manutenção como importante função estratégica para melhorar o resultado e a competitividade das empresas.

Ainda para Kardec e Nascif (2009), a evolução da manutenção pode ser dividida, a partir de 1930, em 4 fases: Primeira Geração, Segunda Geração, Terceira Geração e Quarta Geração.

A Primeira Geração, que tem início no período da 1ª Guerra Mundial, é caracterizada por um período onde os equipamentos eram simples, pouco mecanizados e superdimensionados. Sem muita preocupação com qualidade e produtividade, as indústrias necessitavam apenas que os equipamentos fossem consertados quando apresentassem problemas e conseqüentemente, não havia uma manutenção sistematizada, apenas serviços de limpeza, lubrificação e reparos após a quebra. Assim, para Kardec e Nascif (2009), a manutenção era fundamentalmente corretiva não planejada, ou, de acordo com Mobley (2008), a manutenção era *breakdown* (manutenção corretiva emergencial), em que a manutenção atuava apenas quando ocorria alguma falha.

A Segunda Geração ocorre entre os anos 1950 e 1970, com o fim da 2ª Guerra Mundial, a industrialização criou na sociedade uma dependência crescente de produtos e processos industriais, elevando a concorrência entre as organizações, criando assim, a necessidade do desenvolvimento de técnicas de manutenção voltadas a prevenção de paradas dos processos produtivos com aumento da confiabilidade e da disponibilidade dos equipamentos (SIQUEIRA, 2005). Começa a se evidenciar a necessidade de maior disponibilidade, bem como maior confiabilidade na busca por maior produtividade. Isso levou a ideia de que falhas dos equipamentos poderiam e deveriam ser evitadas, resultando no conceito de manutenção preventiva, que até a década de 60 consistia em intervenções feitas a intervalos fixos (KARDEC; NASCIF, 2009).

A Terceira Geração tem início na década de 1970. A diminuição da capacidade produtiva em decorrência da paralização da produção aumentou os custos e afetou a qualidade dos produtos. Os efeitos da paralização se agravaram com a tendência mundial da utilização de sistemas *just-in-time*, onde estoques reduzidos para a produção em andamento

significavam que pequenas paradas na produção poderiam paralisar a fábrica, além disso, o crescimento da automação e da mecanização passou a indicar que confiabilidade e disponibilidade se tornaram postos-chaves para a manutenção (KARDEC; NASCIF, 2009). O surgimento da RCM (*Reliability Centered Maintenance*) foi um grande avanço no ciclo de evolução da manutenção, o uso de cálculos de confiabilidade na definição das atividades de manutenção para o Boeing 747 foi um marco para esta metodologia (SIQUEIRA, 2005).

A Quarta Geração tem seu início no final da década de 90, a disponibilidade dos equipamentos é uma das medidas mais importantes na performance da manutenção e a confiabilidade dos equipamentos é um fator de busca constante da manutenção. A Engenharia de Manutenção tem na garantia da disponibilidade, confiabilidade e mantenedibilidade suas maiores justificativas de existir dentro da estrutura organizacional. Esta geração é marcada pelo objetivo de se intervir cada vez menos na planta, assim, as práticas de manutenção preditiva e monitoramento da condição dos equipamentos são cada vez mais utilizadas, em decorrência, há uma tendência de redução na aplicação de manutenção preventiva programada e corretiva não planejada (emergência). A manutenção tem o desafio de minimizar as falhas prematuras ou falhas de mortalidade infantil (mais detalhes em MOUBRAY, 1997) e novos projetos devem privilegiar os aspectos de confiabilidade, disponibilidade e custo do ciclo de vida da instalação (KARDEC; NASCIF, 2009).

Para Kardec e Nascif (2009), está em curso o desenvolvimento de uma nova fase em decorrência de uma economia mais globalizada, que induz a busca por maior competitividade. A Unidade de Alta Performance pode ser caracterizada qualitativamente pelas seguintes variáveis:

- a) Alto nível de confiabilidade;
- b) Baixo custo de manutenção;
- c) Automatizada e com controle avançado;
- d) Ecologicamente equacionada;
- e) Intrinsecamente segura;
- f) Baixa necessidade de intervenções;
- g) Atendimento à qualidade futura dos produtos;
- h) Flexibilidade operacional para atendimento das demandas do mercado, com máxima utilização das instalações;
- i) Baixo consumo energético;
- j) Uso otimizado da água;
- k) Alto nível de desempenho, com resultados otimizados.

Ainda para Kardec e Nascif (2009), em uma implementação bem-sucedida, são fundamentais as seguintes ações:

- a) Uso de referenciais de excelência, traduzidos por *benchmarks* do segmento do negócio;
- b) Ter um plano de ação, padrões e procedimentos que permitam atingir os referenciais estabelecidos, nas diversas fases;
- c) A aplicação do conceito, de forma integrada e abrangente, desde a fase do projeto até a plena operação da Unidade, inclusive com a necessária retroalimentação para os novos projetos.

Para Vaccaro (1997), a busca por “vantagens competitivas” tem sido uma das mais importantes metas administrativas e gerenciais de empresas por todo o mundo.

Segundo Fraser, Hvolby e Tseng (2015), historicamente as empresas enxergam a função manutenção e os custos associados, como um “mal necessário”. Entretanto, este sentimento negativo vem sendo, progressivamente, substituído por uma visão que reconhece que a confiabilidade e a manutenção evoluíram para uma importância crítica para o sucesso de longo prazo das organizações.

Na busca pela competitividade empresarial, a gestão da manutenção tem se mostrado um fator extremamente relevante, visto que a produtividade está diretamente relacionada à redução dos custos e pode propiciar aumento do faturamento, melhorias na confiabilidade e, disponibilidade dos equipamentos produtivos, podem contribuir significativamente para aumentar a competitividade das organizações (SELLITTO; BORCHARDT; ARAUJO, 2002; SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007).

Para Leal, Baffa e Garcia (2006), pode-se resumir a contribuição da manutenção em um sistema produtivo como, a maior disponibilidade confiável da planta industrial ao menor custo, ou seja, quanto maior esta disponibilidade, menor a demanda de serviços e custos, resultando assim em maior produtividade da manutenção.

Para Slack, Chambers e Johnston (2002), vale distinguir a manutenção como função e a manutenção como processo, pois enquanto a primeira significa a parte da organização responsável pela produção de serviços que garanta a disponibilidade dos equipamentos, a segunda significa qualquer transformação de recursos de *input* para gerar a disponibilidade dos equipamentos para o cliente interno da produção.

As atividades de manutenção devem ser abordadas em dois blocos: atividades executadas diretamente sobre os equipamentos e atividades que correspondem a estudos,

planejamento, programações, definições de estratégias e políticas de atuação para execução do primeiro bloco de atividades (VAZ, 2003).

A gestão e o controle das atividades de manutenção são igualmente importantes a realização da manutenção (DHILLON, 2002).

2.1 Políticas e Tipos de Manutenção

Dado o aumento do número de equipamentos automatizados, o que torna os processos produtivos mais complexos, paradas ou perda de capacidade de equipamentos podem significar perdas importantes e de difícil recuperação, exigindo mais articulação entre a estratégia de manutenção e a produção (RAMOS FILHO; ATAMANCZUK; MARÇAL, 2010; SANTOS; SELLITTO, 2016).

Na indústria alimentícia isso não é diferente, porque quando uma falha inesperada ocorre, o equipamento em falha para e força a maior parte da linha à frente da falha a operar sem material, causando um *gap* na linha produção, além disso, se a parada for suficientemente longa, pode causar um *gap* adicional, uma vez que o material (bruto, intermediário ou produto final) antes da falha, pode vir a ser descartado devido a deterioração da qualidade durante a parada (TSAROUHAS, 2012).

Em função da manutenção ser, tradicionalmente, planejada a partir da experiência dos funcionários envolvidos, orientados pelos manuais dos fabricantes, corre-se o risco destas recomendações não serem baseadas em dados reais, pois, a fim de maximizar a venda de componentes ou minimizar responsabilidades, alguns fabricantes orientam intervalos curtos de revisão e substituição de partes e componentes (MENDES; RIBEIRO, 2011; RAUSAND, 1998).

Definir uma política adequada de manutenção é uma tarefa importante e muito difícil enfrentada pelo planejamento da manutenção na determinação de uma abordagem ótima para redução de gastos financeiros e custo total do ciclo de vida dos equipamentos (HORNER; EL-HARAM; MUNNS, 1997; CARVALHO, 2012). Para Dhillon (2002), as políticas de manutenção são alguns dos elementos mais importantes para a continuidade das operações e para um entendimento claro dos programas de manutenção.

Para Horner, El-Haram e Munns (1997), as políticas de manutenção devem buscar por uma manutenção mínima o quanto possível, ao mesmo tempo preservando a disponibilidade dos equipamentos ou sistemas, ou seja, a manutenção deve ocorrer somente quando necessária, para garantir a continuidade, segurança, disponibilidade e o uso rentável dos equipamentos ou sistemas.

Deste modo, para Ferrero, Tarrés e Losilla (2002), a otimização da política de manutenção requer uma combinação balanceada entre manutenções preventivas, preditivas e corretivas, sendo que o tipo de manutenção e o intervalo entre manutenções de cada item depende do comportamento de sua taxa de falhas e do custo de cada falha.

As políticas de manutenção buscam minimizar o custo total de manutenção, minimizar o tempo de parada do equipamento ou maximizar a disponibilidade, o que acaba por refletir também nos custos da operação (CARVALHO, 2012).

Ainda para Carvalho (2012), muitas vezes é mais vantajoso substituir componentes em períodos predeterminados, mesmo que estes não tenham apresentado falhas, do que esperar pela ocorrência da falha do sistema, que, do ponto de vista financeiro, pode resultar em desastrosas consequências econômicas.

Desse modo, as políticas de manutenção buscam otimizar a utilização de recursos, sejam eles humanos, materiais ou de capital, entre as diferentes ações de manutenção disponíveis aos gestores.

Assim, o objetivo de uma política de manutenção é conseguir um determinado padrão de desempenho a um custo mínimo (CARVALHO, 2012).

Dias (2010) enfatiza que todos os sistemas falham e não existe um único modo que previna ou elimine todas as falhas, do mesmo modo, não existe uma política de manutenção melhor que outra, cada uma possui seu lugar, o desafio é encontrar qual política e em que lugar ela deve ser aplicada.

2.1.1 Tipos de Manutenção

Para Carvalho (2012), muitos tipos de manutenção têm sido propostos, os quais podem ser incluídos em algumas políticas de manutenção existentes.

Em seu estudo que levantou a publicação de trabalhos sobre modelos de gestão da manutenção, Fraser, Hvolby e Tseng (2015) identificaram uma série de abordagens de manutenção descritos por vários autores. Das 42 abordagens identificadas, algumas ganham destaque por estarem presentes em 10 trabalhos: TPM – *Total Productive Maintenance*; RCM – *Reliability Centered Maintenance*; CBM – *Condition-Based Maintenance*, TQMMain – *Total Quality Maintenance*, PM – *Preventive Maintenance* e CM – *Corrective Maintenance*.

Para Ramos et al. (2014), ao longo do tempo os tipos de manutenção foram se estendendo de modo a serem mais abrangentes, atendendo as novas exigências do mercado, sendo a manutenção corretiva, a manutenção preventiva e a manutenção preditiva as mais conhecidas.

2.1.1.1 Manutenção Corretiva

Uma parte importante do esforço da gestão da manutenção é gasto em manutenção corretiva. Assim, a manutenção corretiva é um fator importante na efetividade da gestão da manutenção (DHILLON, 2002).

De modo geral, o principal objetivo da manutenção corretiva é corrigir ou restaurar as condições de funcionamento do equipamento ou sistema, dado que este apresenta desempenho deficiente ou a ocorrência de falhas (VAZ, 2003).

Para Mobley (2008) e Kardec e Nascif (2009) a Manutenção Corretiva pode ser dividida em duas abordagens: corretiva de emergência (*breakdown*) ou não planejada e corretiva planejada.

A Manutenção Corretiva de Emergência ou Manutenção Não Planejada é caracterizada por atividade reativa de manutenção, ou seja, ocorre após a ocorrência de uma falha e seu foco é o rápido restabelecimento das funções do equipamento, atuando na resolução dos sintomas da falha e não nas causas. Este tipo de manutenção além de ser ineficiente é de alto custo, isso porque as atividades de reparo não são planejadas e não se busca eliminar as causas da falha, executando-se uma manutenção incompleta. Como resultado, a confiabilidade do equipamento é severamente reduzida e a frequência de falhas aumentada, junto com os custos de manutenção (KARDEC; NASCIF, 2009; MOBLEY, 2008; VAZ, 2003).

Para Mobley (2002) por seu caráter reativo, a manutenção corretiva não planejada força o departamento de manutenção manter um estoque extensivo de peças de reposição, o que se traduz em um alto custo de inventário.

Assim como a Manutenção Corretiva de Emergência, a Manutenção Corretiva Planejada é uma ação corretiva realizada em função da ocorrência de falhas ou deficiências, isto é, os problemas ocorrem antes das atividades de manutenção serem realizadas, porém, se distingue da primeira por dois fatores: 1) busca eliminar as falhas encontradas durante a manutenção preventiva para reparar um componente ou sistema ao seu estado de operação e 2) busca eliminar não somente os sintomas, mas as causas da falha (DHILLON, 2006; MOBLEY, 2008).

De acordo com Ramos et al. (2014), a manutenção corretiva é utilizada quando uma falha ou qualquer outro problema possa ocasionar a indisponibilidade do componente ou sistema.

A manutenção corretiva também pode ser planejada em função do acompanhamento preditivo do comportamento dos componentes ou sistemas e, de acordo com Vaz (2003), existe uma superposição de conceitos com a Manutenção Preditiva.

O principal objetivo da manutenção corretiva planejada é eliminar as paradas de emergência (não planejadas), propondo uma manutenção completa, ou seja, busca e eliminação das causas das falhas, reduzindo intervenções não necessárias, otimizando as atividades de manutenção, reduzindo o custo do ciclo de vida, aumento da disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos (MOBLEY, 2008).

2.1.1.2 Manutenção Preventiva

A finalidade básica de executar manutenção preventiva é manter instalações e/ou equipamentos em condições satisfatórias por meio de inspeção e correção de deficiências em estágios iniciais (DHILLON, 2002).

A Manutenção Preventiva busca evitar a ocorrência de falhas, ou seja, o que se busca é prevenir que as falhas ocorram (KARDEC; NASCIF, 2009; VAZ, 2003) e foi introduzida para superar as desvantagens da manutenção corretiva, reduzindo a probabilidade de ocorrência de falhas (HORNER; EL-HARAM; MUNNS, 1997).

A manutenção preventiva é feita em intervalos pré-determinados e visa eliminar ou reduzir a probabilidade de falhas ou a degradação do serviço prestado (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2002). Esta modalidade de manutenção preventiva é denominada “por tempo”, onde um tempo determina o intervalo das intervenções. Existe uma outra, denominada “por estado”, onde um estado ou condição da máquina determina o momento da intervenção. As duas são consideradas manutenções preventivas, mas com fatores determinantes do intervalo de intervenção diferentes: tempo e estado.

Para Vaz (2003), esta definição tem como objetivo assegurar a confiabilidade de um equipamento, reduzindo falhas e aumentando a disponibilidade do equipamento ou sistema.

De acordo com Carvalho (2012), o tipo de manutenção preventiva assume que as manutenções são perfeitas ou mínimas e os tempos de manutenção são negligenciáveis, isso implica em estados “tão bom quanto novo” (*as good as new*) ou “tão mau como imediatamente antes da manutenção” (*as bad as old*) após as intervenções de manutenção.

Ainda para Carvalho (2012), na prática nem sempre se verificam estas considerações, isto é, a condição de um sistema complexo após uma ação de manutenção situa-se, com certa frequência, entre a condição “tão bom quanto novo” e “tão mau como imediatamente antes da manutenção”, ou seja, a manutenção é imperfeita. Do mesmo modo, os tempos de

manutenção negligenciáveis também não são realistas, pois, em muitas indústrias, as perdas de produtividade devido a tempos de indisponibilidade são muito elevadas. Nestes casos, o entendimento do tempo de parada é obrigatório.

Por outro lado, além de retirar o equipamento ou sistema de operação para a realização dos serviços programados, mesmo quando falhas não são reportadas, ocasionando indisponibilidade, a manutenção preventiva pode introduzir defeitos devido a falha humana, falta de qualidade das peças de reposição, introdução de contaminação, danos durante paradas e partidas e falhas das próprias instruções de manutenção (VAZ, 2003).

Para Dhillon (2002) e Vaz (2003), apesar de com a manutenção preventiva ser possível a redução de estoques de peças de reposição, resultando em economia de custos de inventário, ela também pode causar o uso excessivo de peças de reposição, dado que uma das características da manutenção preventiva é a substituição de itens por outro novo, dado que o original funcionou por um período determinado de tempo, ainda que não tenha apresentado falha, ocasionando assim, aumento do custo de manutenção.

A manutenção preventiva é guiada pelo tempo, ou seja, as atividades da manutenção preventiva são baseadas no tempo gasto ou nas horas de operação e o MTTF (*mean time to failure*) e a curva da banheira, são utilizados para indicar a probabilidade de falha do equipamento ou sistema durante seu tempo de operação, o MTBF (*mean time between failure*) deve ser usado para o agendamento das intervenções planejadas de manutenção (MOBLEY, 2002).

2.1.1.3 Manutenção Preditiva

O objetivo da manutenção preditiva é prevenir falhas com o acompanhamento contínuo de parâmetros de estado e condição de desempenho dos componentes ou sistemas e o resultado deste monitoramento é a base para decidir pela manutenção do equipamento (HORNER; EL-HARAM; MUNNS, 1997; MOBLEY, 2002; VAZ, 2003).

É a primeira grande quebra de paradigma na manutenção e se intensifica mais quanto mais o conhecimento tecnológico desenvolve equipamentos que permitam avaliação confiável das instalações e sistemas operacionais em funcionamento (KARDEC; NASCIF, 2009).

Para Vaz (2003) a adoção deste tipo política requer um sistema de informações eficaz para o registro sobre o estado dos equipamentos.

De acordo com Mobley (2002), a manutenção preditiva é uma filosofia que usa o estado atual de operação do equipamento ou sistema para otimizar a operação total da planta fabril.

Assim, quando se aproxima ou se atinge o limite pré-estabelecido do grau de degradação do equipamento, é executada a manutenção. Desse modo, se permite a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível (VAZ, 2003).

Para Horner, El-Haram e Munns (1997), o monitoramento da condição de desempenho do equipamento pode ser feito a partir de uma simples inspeção visual até uma inspeção mais avançada com o uso de ferramentas e técnicas de monitoramento.

Desse modo, a adoção da manutenção preditiva requer algumas condições (VAZ, 2003):

- I. Que o equipamento ou sistema permita algum tipo de monitoração;
- II. Que o equipamento ou sistema mereça essa política de manutenção, em função do custo envolvido;
- III. As causas das falhas sejam passíveis de monitoramento;
- IV. Seja estabelecido um programa sistematizado de acompanhamento, análise e diagnóstico.

Assim, a implementação da manutenção preditiva está condicionada a disponibilidade efetiva de um sistema de monitoramento e, a viabilidade de seu uso, esbarra no custo/benefício de sua implantação.

2.2 Engenharia de Manutenção

Para Kardec e Nascif (2009), praticar a Engenharia de Manutenção significa uma mudança cultural. É a segunda grande quebra de paradigma na manutenção.

Cabe a Engenharia de Manutenção a busca das melhores práticas e técnicas modernas para serem aplicadas na manutenção industrial, sendo seu objetivo a diminuição de intervenções de manutenção através da melhoria das condições operacionais dos componentes (KARDEC; NASCIF, 2009).

A Engenharia de Manutenção promoverá o progresso tecnológico da Manutenção através da aplicação de conhecimentos científicos e empíricos na solução de dificuldades encontradas nos processos e equipamentos, perseguindo a melhoria da manutenibilidade da máquina, maior produtividade e a eliminação de riscos em segurança do trabalho e danos ao meio ambiente (VIANA, 2002).

Nesse sentido, Kardec e Nascif (2009) apontam que ganhos reais de melhoria contínua são alcançados a partir do momento em que a Manutenção estiver utilizando técnicas preditivas, pois o número de intervenções cairá drasticamente, o consumo de sobressalentes também, e o número de horas-hora alocado a esses equipamentos será, conseqüentemente,

reduzido, assim, quando a gestão da manutenção estiver utilizando para análises, estudos e proposição de melhorias, todos os dados que o Sistema de Preditiva colhe e armazena, estará praticando Engenharia de Manutenção.

2.3 Manutenção Centrada na Confiabilidade

O mercado exige cada vez mais máquinas e equipamentos de baixo custo e com alta qualidade, que execute tarefas cada vez mais complexas em tempos cada vez menores, com segurança e máxima disponibilidade. Neste contexto, os agentes da manutenção industrial são motivados a estudarem e reorganizarem o tempo em atividades que leve à tomada de decisão em conjunto com o sistema de produção (DIAS, 2010).

Ainda segundo Dias (2010), o que se busca é um sistema de gestão da manutenção que possa fornecer maiores resultados que os obtidos pela manutenção centrada no reparo (MCR). Nesse sentido, a *Reliability Centered Maintenance* (RCM) ou Manutenção Centrada na Confiabilidade, ganha destaque.

Como uma moderna prática de manutenção, a RCM, foi originada na indústria aeronáutica na década de 1970 e, desde então, vem sendo adotada por vários outros setores, como forças armadas, energia nuclear, óleo e gás e em muitas outras (BRAUER, D.; BRAUER, G., 1987; RAUSAND, 1998).

Na RCM se estudam e classificam os modos de falha, suas severidades, seus efeitos e possibilidades de ocorrência e, com o apoio de modelos probabilísticos, determina-se o risco da operação sob certas circunstâncias (SELLITTO; BORCHARDT; ARAUJO, 2002).

A RCM vem sendo aplicada com considerável sucesso por mais de 20 anos, a experiência de várias indústrias apresenta significativa redução nos custos de manutenção preventiva ou mesmo aumento da disponibilidade dos sistemas (RAUSAND, 1998).

De acordo com Carretero et al. (2003) existe várias definições para RCM. De forma resumida, os autores definem a RCM como uma abordagem sistemática para a funcionalidade dos sistemas, as falhas destas funcionalidades, causas e efeitos de falhas e a infraestrutura afetada pelas falhas.

Para Afefy (2010) a RCM é uma das ferramentas mais conhecida e mais utilizada na preservação da eficiência operacional dos sistemas. Isso é possível porque a RCM opera através do balanceamento entre os altos custos de manutenção corretiva e os custos de políticas de manutenção preventiva, tendo em vista a vida útil do item considerado (AFEFY, 2010; YSSAAD; KHIAT; CHACKER, 2014).

Por meio de análise quali-quantitativa de falhas a RCM é capaz de reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas e redução dos custos de manutenção pela substituição de atividades preventivas de alto custo por procedimentos mais adequados e de menor custo, sendo necessário para isso, o entendimento do contexto operacional no qual o equipamento se encontra, razão pela qual equipamentos idênticos podem demandar diferentes tarefas de manutenção segundo o contexto (PEREIRA, 2009 apud DIEDRICH; SELBITTO, 2014).

O principal objetivo da RCM é criar uma rotina de manutenção que preserve as funções de sistemas e equipamentos de forma efetiva e com custos adequados (RAUSAND, 1998; WILMETH; USREY, 2000).

Para Moubray (1997) e Rausand (1998), através da RCM é possível responder as seguintes questões:

1. Quais são as funções e os respectivos padrões de desempenho do equipamento no presente contexto operacional?
2. De que forma este equipamento falha no cumprimento de suas funções?
3. O que ocasiona cada falha funcional?
4. O que acontece quando cada falha ocorre?
5. De que forma cada falha é significativa?
6. O que pode ser feito para prevenir cada falha?
7. O que deve ser feito se não for possível encontrar um plano de manutenção preventiva apropriado?

2.3.1.1 O Processo da RCM

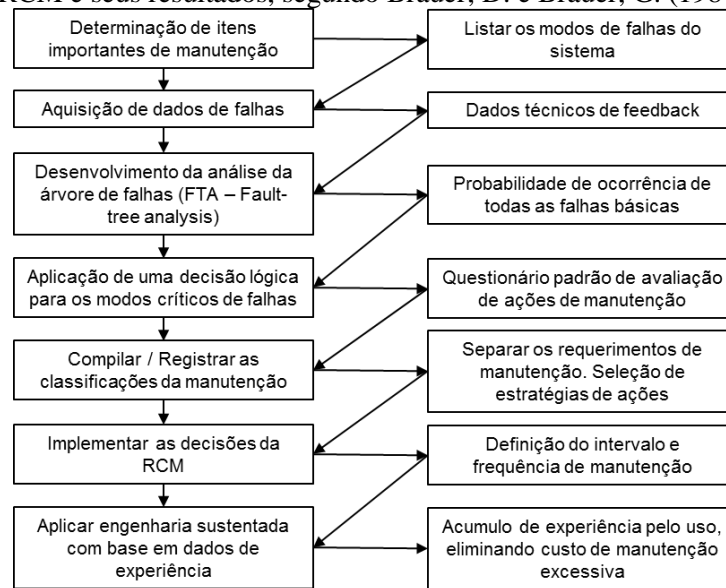
A RCM aplica, de forma integrada, estratégias de manutenção corretiva, manutenção preventiva e práticas de manutenção preditiva, buscando um balanceamento ótimo entre estas estratégias, de forma a alcançar um desempenho superior, comparado ao uso individual de cada uma, maximizando a confiabilidade dos equipamentos e reduzindo os custos associados ao ciclo de vida (AFEFY, 2010).

A RCM atinge os objetivos de segurança, confiabilidade e custos usando uma abordagem bem definida na análise de confiabilidade para destacar áreas com problemas e definir programas de manutenção mais eficazes para o sistema ou equipamento (BRAUER, D.; BRAUER, G., 1987).

No entanto, esta abordagem bem definida pode ser bastante diferente na visão de cada autor

Brauer, D. e Brauer, G. (1987) apresentam o processo da RCM contendo 7 passos básicos para sua implementação. A Figura 1 apresenta estes passos e seus resultados.

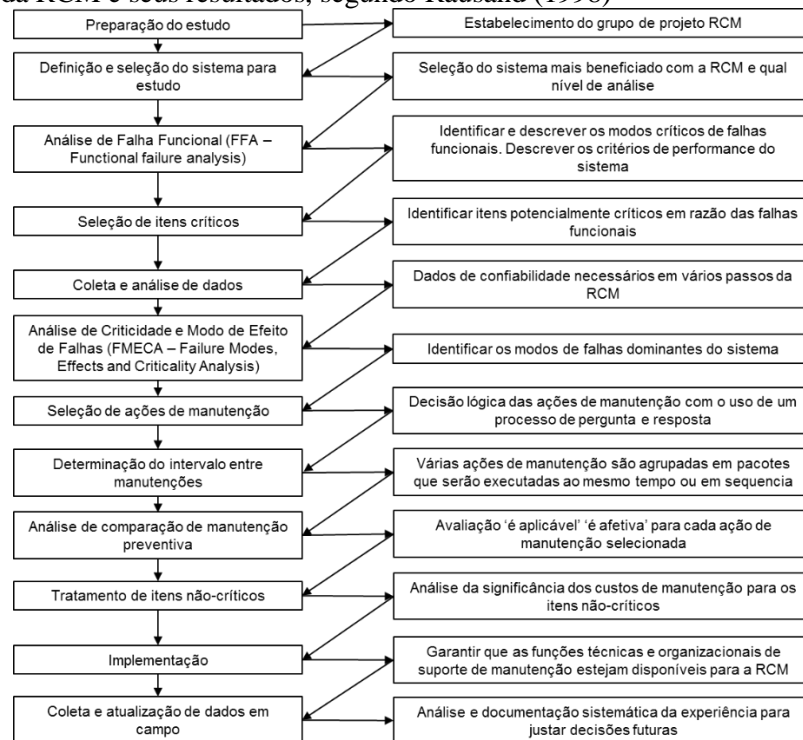
Figura 1 – Processo da RCM e seus resultados, segundo Brauer, D. e Brauer, G. (1987)



Fonte: Adaptado de Brauer, D. e Brauer, G. (1987)

Para Rausand (1998) o processo da RCM possui 12 passos bem definidos. A Figura 2 apresenta estes passos e seus resultados.

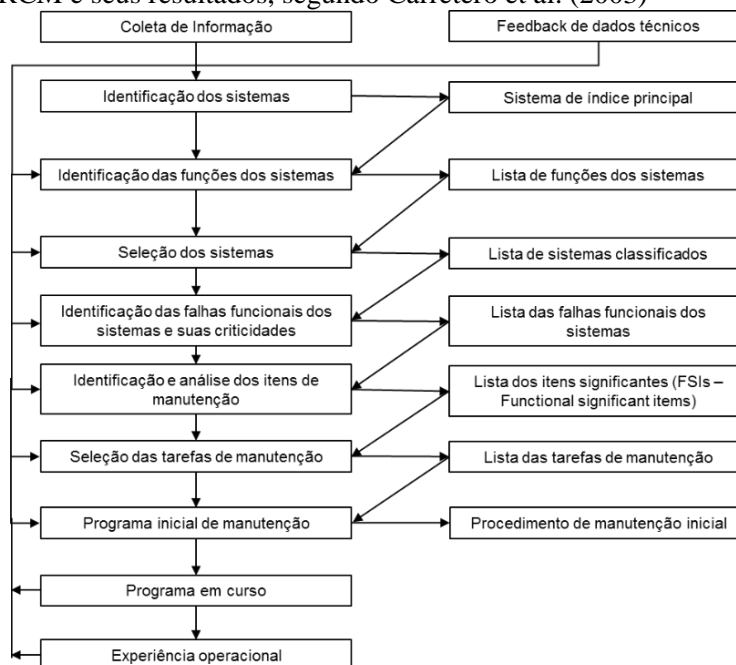
Figura 2 – Processo da RCM e seus resultados, segundo Rausand (1998)



Fonte: Adaptado de Rausand (1998)

Carretero et al. (2003) elenca 10 passos no processo da RCM. A Figura 3 apresenta estes passos e seus resultados.

Figura 3 – Processo da RCM e seus resultados, segundo Carretero et al. (2003)



Fonte: Carretero et al. (2003, p. 258).

Como não há consenso entre os autores quanto aos passos necessários para a implementação da RCM, será feita a seguir uma breve descrição do processo da RCM de acordo com Brauer, D. e Brauer, G. (1987):

Passo 1 - Determinação de itens importantes de manutenção:

Tradicionalmente, itens importantes (p.ex. modos de falhas de componentes, seus efeitos e criticidade) são identificados conduzindo uma Análise do Modo de Falhas, Efeitos e Criticidade – FMECA (*Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis*) como parte das atividades de engenharia de confiabilidade relacionadas ao projeto. Por meio do FMECA é possível a identificação dos modos de falhas dos sistemas e componentes, fornecendo detalhes para a definição de atividades de manutenção preventiva e/ou corretivas. A Análise de Árvore de Falhas – FTA (*Fault Tree Analysis*) identifica componentes críticos de segurança e fornece dados quantitativos dos modos de falhas que ajudam a responder as questões lógicas da RCM (passo 4). A FTA é um método efetivo que pode ser usado para determinar os itens importantes de manutenção.

Passo 2 - Aquisição de dados de falhas: Taxa de falha parcial, probabilidade de erro do operador e dados de eficiência de inspeção são entradas necessárias para

determinar probabilidades de ocorrência e avaliar a criticidade das falhas. A determinação das taxas de falha parcial envolve a coleta e revisão de dados de taxa de falha genéricos ou reais. Erro do operador é representado pela probabilidade de a falha ter sido causada por um operador. É muito difícil obter-se esta probabilidade, uma vez que existem poucos desses dados disponíveis. Desse modo, na falta de uma grande base de dados, a probabilidade de erro do operador pode ser desenvolvida através de técnicas subjetivas baseadas em discussões com pessoas familiarizadas com o ambiente de operação do sistema. Essas técnicas envolvem a modelagem do desempenho do operador do mesmo modo que a modelagem da taxa de falha parcial.

Passo 3 - Desenvolvimento da análise de árvore de falhas: As probabilidades de ocorrência para todas as falhas básicas, eventos e condições perigosas (falhas superiores) são calculadas com base nas propriedades combinatórias dos elementos lógicos na árvore de falhas. A análise envolve aplicações repetidas de expressões de probabilidade básicas para as portas-lógica da árvore de falhas. Dada uma árvore de falhas (consistindo em falhas básicas e eventos de saída que estão corretamente interligados), as probabilidades de evento de saída são computadas. A sensibilidade, ou a probabilidade condicional, é a probabilidade de uma ocorrência de uma falha básica causar um incidente de segurança. A criticidade é uma medida da gravidade relativa ou impacto de cada falha no evento superior. Envolve avaliação qualitativa da engenharia e análise quantitativa e, fornece uma base para classificar as falhas em sua ordem de gravidade.

Passo 4 - Aplicação de uma decisão lógica para os modos críticos de falhas: A lógica de decisão RCM é projetada para levar, através do uso de questões de avaliação padrão, as combinações de tarefas de manutenção preventiva mais efetivas, as respostas sim ou não simples são registradas em uma planilha ou entram diretamente no sistema de computador. Essa lógica de decisão é aplicada a cada modo crítico de falha (da FTA) para cada item de manutenção importante. Como cada modo de falha identificado é processado, julgamentos são feitos quanto à necessidade de várias tarefas de manutenção. As tarefas consideradas necessárias, juntamente com os intervalos determinados como apropriados, formam o programa de manutenção preventiva programada total. A lógica de decisão tem dois níveis. Nível 1, requer avaliação de cada modo de falha para determinação da categoria de consequências, isto é, segurança (evidente),

econômico (operacional), econômico (não operacional), segurança (oculta) ou não-segurança / econômica. Nível 2, leva em conta as causas de falha para cada modo de falha para selecionar o tipo específico de tarefa.

Passo 5 - Compilar/registrar as classificações da manutenção: A aplicação da lógica de decisão (passo 4) segrega os requisitos de manutenção em três categorias e definem um perfil de tarefas de manutenção: i) requisitos de manutenção sob condição - cronograma de inspeção ou teste projetado para medir a deterioração de um item. Com base na deterioração do item, a manutenção corretiva é realizada ou o item permanece em serviço. ii) requisitos de manutenção *Hardtime* - remoção programada em intervalos fixos predeterminados de idade ou uso. iii) requisitos de manutenção de monitoramento de condições - testes ou inspeções não programados em componentes em que a falha pode ser tolerada durante a operação do sistema ou onde a falha iminente pode ser detectada através de monitoramento de rotina durante as operações normais.

Passo 6 - Implementar as decisões da RCM: Uma vez que a tarefa de manutenção foi estabelecida, as frequências / intervalos das tarefas são definidas e promulgadas como parte do plano de manutenção total. Definir as frequências / intervalos das tarefas exige primeiro determinar se os dados necessários estão disponíveis, o que sugere um intervalo adequado para a realização da tarefa. O conhecimento prévio pode ser usado, o que mostra que uma tarefa de manutenção agendada oferece evidências substanciais de serem efetivas e economicamente valiosas. Se não houver conhecimento prévio ou se não houver uma semelhança suficiente entre os sistemas anteriores e atuais, a frequência / intervalo da tarefa pode ser estabelecida inicialmente pelo pessoal de engenharia e manutenção com experiência, usando bom julgamento e experiência operacional em conjunto com dados de confiabilidade precisos. Se as falhas são adequadamente modeladas por um processo de Poisson, uma distribuição de Poisson pode ser usada para prever a probabilidade de ocorrência de falhas em um determinado período de tempo. Com uma confiabilidade alvo e uma taxa de falha conhecidas, um intervalo de manutenção preventiva pode ser calculado para cada item.

Passo 7 - Aplicar a engenharia sustentada com base em dados de experiência: O processo RCM tem uma perspectiva de ciclo de vida. A força motriz é a redução da carga de manutenção agendada e do custo de suporte, mantendo o estado de prontidão necessário. Tal como acontece com outras análises e tarefas de

confiabilidade e logística, o processo lógico é reaplicado à medida que os dados disponíveis se movem de um estado previsto para valores reais de experiência operacional com maior grau de certeza. Ao desenvolver o programa de manutenção inicial usando o processo RCM, é frequentemente necessário tomar decisões em tempo real sem informações adequadas. A lógica de decisão RCM (passo 4) é estruturada para produzir práticas seguras em tais situações através da seleção, por padrão, do curso mais conservador. Esta prática de empregar lógica padrão é o curso mais seguro, mas também é o mais caro. Consequentemente, uma das etapas mais urgentes a serem realizadas uma vez que um sistema está operacional e uma base de experiência começa a se acumular, é eliminar o custo de manutenção excessivo, mantendo os níveis estabelecidos e exigidos de confiabilidade e segurança.

Para Rausand (1997), a RCM fornece uma compreensão completa das funções do sistema, requisitos funcionais, falhas funcionais e causas e consequências funcionais. Este conhecimento é estabelecido e documentado através de um trabalho em equipe e cooperação entre várias áreas da empresa.

A RCM atua diretamente na política ou forma de atuação da Manutenção e a Manutenção influencia diretamente nos aspectos vitais do negócio, como disponibilidade, segurança e integridade, assim, a RCM deve ser aplicada aos sistemas ou equipamentos mais importantes prioritariamente, aqueles que geram maior retorno ou cuja falha implica em maiores custos (KARDEC; NASCIF, 2009).

2.3.1.2 Falha Funcional e Curvas de Falha

Falha pode ser definida como a cessão de uma função requerida de um item ou a incapacidade de satisfazer a um padrão de desempenho definido, assim, falha pode ser considerada como a perda dessa função.

A RCM define falha funcional como a incapacidade de um item desempenhar uma função específica dentro de limites desejados de performance.

De acordo com Kardec e Nascif (2009), a RCM aborda o gerenciamento das falhas da seguinte forma:

- COMO o item pode falhar.
- O QUE pode causar a falha.

Uma vez analisados estes aspectos, parte-se para a identificação dos Modos de Falhas, essa análise busca identificar com detalhes as causas da falha e, ao mesmo tempo, registrar

seus efeitos, porque somente com a compreensão exata desse processo pode levar a ações que impeçam sua ocorrência.

O processo de RCM foi desenvolvido na década de 70 na indústria de aviação, que na época experimentava cerca de 60 quedas por milhão de decolagens e 40% dos acidentes eram atribuídos a falhas em equipamentos. Era o início do desenvolvimento do Boeing 747, Douglas DC10 e Lockheed L1011 e, com receio de que estes níveis de acidentes impactassem negativamente o crescimento da oferta, as empresas decidiram aumentar a quantidade de manutenções preventivas, porém, se depararam com a situação em que o aumento da manutenção proporcionava resultados piores (KARDEC; NASCIF, 2009).

Dois equipamentos operando sob as mesmas condições podem apresentar comportamento de falhas diferentes (curva de falhas), pois estes comportamentos são afetados por diversos fatores, entre eles o modo como foi executado o projeto de instalação, a qualidade dos componentes utilizados, o modo como os serviços de manutenção são executados (fator humano) e etc.

A curva de falhas ou taxa de falha, ou ainda curva de risco, é a probabilidade de uma falha ocorrer em um intervalo de tempo, dado que esta ainda não ocorreu. Representa as proporções de falhas ocorrendo por unidade de tempo (COLOSIMO; GIOLO, 2006; KECECIOGLU, 2002a).

A curva de falhas pode assumir um comportamento (forma) com taxa crescente (taxa de falha aumenta com o passar do tempo), constante (a taxa de falha não se altera com o passar do tempo) ou decrescente (a taxa de falha diminui com o passar do tempo).

Sabe-se que o tempo de vida é uma combinação destas curvas em diferentes períodos de tempo. Especialistas em confiabilidade geralmente descrevem o tempo de vida de uma população de produtos usando uma representação gráfica chamada curva da banheira, apresentada na Figura 4 – Curva A. Ela é uma representação genérica da taxa de falha que identifica as três fases do ciclo de vida de um item: mortalidade infantil (taxa de falha decrescente), maturidade (taxa de falha constante) e mortalidade senil ou fase de desgaste (taxa de falha crescente) (CARVALHO, 2012; COLOSIMO; GIOLO, 2006; DHILLON, 2006; EBELING, 1997; KECECIOGLU, 2002a; TOBIAS; TRINDADE, 2011).

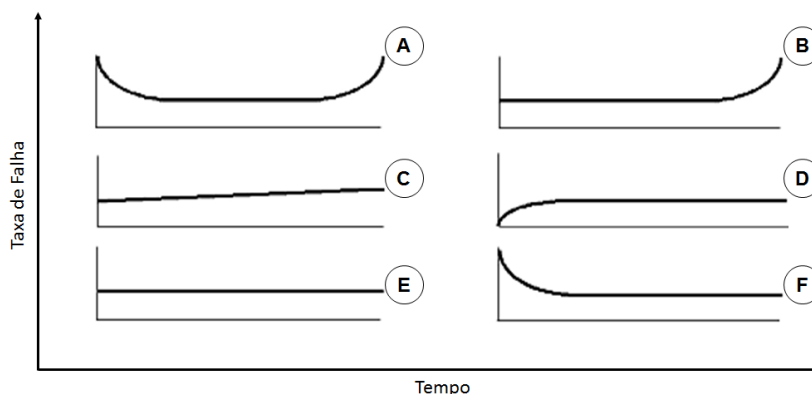
A origem desta curva não é clara, aparece nas tabelas de vida da análise atuarial desde 1693. Ela é descrita em quase todos os textos de confiabilidade para descrever o comportamento de falhas de equipamentos, componentes e sistemas (KLUTKE; KIESSLER; WORTMAN, 2003).

Estudos realizados sobre a Manutenção Centrada na Confiabilidade concluíram que quando se admite que todos os equipamentos ou sistemas obedecem a uma mesma curva de falhas, o uso desta metodologia tem pouco efeito na confiabilidade final dos mesmos (BRAND, 2011), pois sabe-se que nem todos os equipamentos possuem o mesmo comportamento. Assim, quando se admite que todos os equipamentos ou sistemas apresentam a mesma curva de falhas ao longo do ciclo de vida útil, o uso da RCM tem pouco efeito na confiabilidade dos equipamentos.

No entanto, nem todos os tipos de equipamentos ou sistemas apresentam todas as fases da curva da banheira, como por exemplo, um programa de computador que se enquadra como um sistema que possui somente a fase de mortalidade infantil (LAFRAIA, 2001 apud MENGUE; SELITTO, 2013).

Com a evolução e aumento da complexidade dos equipamentos e sistemas, houve uma mudança no padrão de falhas destes, assim, o processo da RCM adotou o modelo em que os seis tipos de curvas de falhas apresentadas na Figura 4 são utilizadas para caracterizar a vida útil dos equipamentos e sistemas e não somente a curva da banheira. De acordo com Kardec e Nascif (2009), estas curvas foram levantadas num estudo produzido pela United Airlines.

Figura 4 – Tipos de curvas de falhas



Fonte: Adaptado de Moubray (1997)

Uma breve análise das curvas indica que:

- Tipo A – curva da banheira. caracterizada por um período de mortalidade infantil, período de vida útil com falhas aleatórias (maturidade) e desgaste acentuado (mortalidade senil). Exemplos: motores elétricos, engrenagens e ventiladores;
- Tipo B – nesse caso ocorrem poucas falhas prematuras durante a vida útil, com desgaste acentuado após determinado período. Exemplos: válvulas e pistões;
- Tipo C – mecanismo que apresenta índice de falhas crescente e constante; elas não ocorrem por desgaste, e sim por fadiga. Exemplos: compressores de ar, turbinas, engrenagens e rolamentos;

- Tipo D – no início da vida útil a taxa de falhas é baixa, porém, em seguida, a taxa de falhas é constante. Exemplo: itens exaustivamente testados antes de serem instalados;
- Tipo E – falhas descritas por esse mecanismo são bastante aleatórias e podem ocorrer sem aviso em qualquer período, dessa forma, é impossível prever o tempo de vida do componente. Exemplo: lâmpadas;
- Tipo F – apresenta alto índice de mortalidade infantil e, com o tempo, diminuem a uma taxa constante. Exemplo: componentes eletrônicos e softwares.

Os tipos D, E e F representam falhas típicas em equipamentos complexos, por exemplo, hidráulicos e elétricos (KARDEC; NASCIF, 2009).

De acordo com Kardec e Nascif (2009), estudos realizados pela United Airlines e Bromberg na Suécia em 1973 para aviões e pela Marinha dos Estados Unidos para navios, indicam resultados bastante similares, situando as falhas randômicas entre 77% e 92% do total de falhas da população e falhas relacionadas a idade entre 8% e 23%. Ainda segundo os autores, os estudos indicam que apenas uma fração dos componentes, cerca de 3% a 4%, apresentam o comportamento da curva da banheira (curva Tipo A) ao longo de sua vida útil, outros 4% a 20% dos componentes apresentam uma região de envelhecimento durante a vida útil (curvas Tipo A e B) e, considerando que a curva Tipo C também apresenta um padrão de envelhecimento, significa que entre 8% e 23% dos componentes apresentam esta característica. Os estudos indicam ainda que, para aviões, a percepção generalizada de que 9 entre 10 componentes apresentam comportamento da curva da banheira, a análise indica justamente o contrário, pois entre 77% e 92% dos componentes não apresentaram envelhecimento ou desgastes ao longo de sua vida útil, tipo comportamento das curvas Tipo D, E e F, porém, cabe ressaltar que muitos componentes experimentaram o fenômeno de mortalidade infantil (curvas A e F).

Para Kardec e Nascif (2009), enquanto que na 2ª fase da Manutenção (Segunda Geração) se acreditava que o aumento da disponibilidade era garantido por algum tipo de manutenção preventiva, ou ainda, quanto mais era revisado menor a probabilidade de o equipamento apresentar falhas, a caracterização dos padrões de falhas para equipamentos complexos (curvas Tipo E e F) contradiz essa crença. Na realidade o que se observa para equipamentos complexos é que limites de idade não proporcionam aumento da confiabilidade e a adoção de revisões programadas pode introduzir defeitos, no entanto, a manutenção preventiva faz sentido para as curvas Tipo A e B desde que os equipamentos sejam simples e com padrões de falha com idade de desgaste identificáveis.

Ainda na Figura 4 é possível observar que a curva da banheira pode apresentar nas suas fases o comportamento das demais curvas.

Para Sellitto (2007), em equipamentos complexos e sistemas integrados de produção fabril, é mais vantajoso o uso apenas da curva da banheira (Tipo A), pois quase todos os componentes de interesse da manutenção industrial estão representados em uma das fases da curva da banheira, interessando também conhecer a evolução do equipamento no ciclo de vida, ou seja, como este se desloca na curva ao longo do tempo.

Desta forma, assume-se que os equipamentos ou sistemas apresentam ao longo de sua vida útil, algumas fases da curva da banheira, não necessariamente todas.

Este trabalho seguirá a sugestão de Sellitto (2007) e utilizará a curva da banheira para o estudo do comportamento das falhas dos equipamentos, assumindo que estes equipamentos podem apresentar ciclo de vida em algumas fases da curva, não necessariamente todas.

Sellitto (2005) descreve a relação entre as fases do ciclo de vida da curva da banheira e a escolha de estratégias usuais de manutenção de equipamentos. No Quadro 1 se resumem os relacionamentos entre estratégias de manutenção e as fases do ciclo de vida de equipamentos.

Quadro 1 – Relação entre as fases do ciclo de vida da curva da banheira e estratégias de manutenção

Fases	Estratégia	Decorrência
Mortalidade Infantil, falhas de origem	Emergência	Retarda ou até impede o fim da mortalidade infantil ao não reforçar os itens que quebraram ou não remover as causas das falhas de origem.
	Corretiva	Antecipa o fim da mortalidade infantil ao reforçar os itens que quebraram ou remover as causas das falhas de origem.
	Preditiva	Monitorar as falhas em progresso que podem resultar em quebra, mas estas são muito poucas nesta fase, pois as quebras se dão mais por baixa resistência.
	Preventiva	Perpetua ou até agrava a mortalidade infantil ao trocar exatamente os sobreviventes, os itens que não tem falhas de origem.
Maturidade, falhas aleatórias	Emergência	Como se limita a trocar componentes quebrados, pode fazer retornar à mortalidade infantil se não selecionar os substitutos.
	Corretiva	É inócua quanto às falhas catastróficas, mas pode reduzir o patamar de expectativa de falhas eliminando modos de falha que passaram da primeira fase.
	Preditiva	Informa o início e monitora os processos de falhas progressivas que resultarão em quebras, podendo prever aumentos na probabilidade de quebra.
	Preventiva	Retorna à mortalidade infantil ao trocar exatamente os sobreviventes, os itens fortes, que não tem falhas de origem e ainda não iniciaram o desgaste.

Desgaste, falhas progressivas	Emergência	Permite que as quebras que vão ocorrer realmente ocorrerão a um custo interno mais baixo do que a preventiva.
	Corretiva	Só será útil se for capaz de retardar ou o início da falha ou a quebra que realmente vai ocorrer.
	Preditiva	Monitora os processos progressivos de falhas já iniciados predizendo aumentos na probabilidade de quebra.
	Preventiva	Previne a emergência antecipando a troca à quebra que realmente vai ocorrer, porém a um custo interno mais alto do que a emergência.

Fonte: Sellitto (2005)

3 FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

Qualidade e confiabilidade não são grátis, mas baixa qualidade e confiabilidade normalmente custam muito mais que alta qualidade e confiabilidade. Garantias, *recalls* e reparações custam milhares de dólares a cada ano porque qualidade e confiabilidade não ganham a devida atenção durante o desenvolvimento, manufatura e estágios de uso dos produtos para atingir a satisfação dos clientes (IRESON; COOMBS; MOSS, 1995).

Ebeling (1997) associa a confiabilidade com a qualidade afirmando que a baixa qualidade leva a baixa confiabilidade, do mesmo modo, a alta qualidade leva a alta confiabilidade, assim, a confiabilidade pode ser vista como a qualidade operacional dos produtos ao longo do tempo.

De forma similar, Vaccaro (1997) aponta que na seguinte afirmação “os produtos daquela marca quebram no primeiro uso”, apesar dos termos qualidade e confiabilidade não serem mencionados, o senso comum é de que tais produtos não possuem qualidade, pois não cumprem sua função.

Vaccaro (1997) complementa seu argumento dizendo que essa visão não está de toda errada, porém, ela é muito superficial, pois desconsidera questões de uso e da forma de uso dos produtos. Componentes não são eternos, todos falharão, o ponto fundamental que distingue qualidade de confiabilidade é a variável tempo. Assim, para a afirmação acima, falta não somente qualidade, mas “qualidade ao longo do tempo”, isto é, Confiabilidade.

3.1 Conceito de Confiabilidade

Segundo Ebeling (1997), pode-se definir confiabilidade como a probabilidade de um componente ou sistema funcionar durante um período de tempo dado quando usado sob certas condições operacionais.

Para Kececioglu (2002a), confiabilidade é a melhor medida quantitativa da integridade de um componente, produto ou sistema.

A percepção de confiabilidade vem mudando ao longo do tempo, enquanto nas décadas de 1960 e 1970 era uma unidade discreta na matriz organizacional, atualmente é parte integral do time de engenharia (IRESON; COOMBS; MOSS, 1995).

Para Rausand (1994), pode-se distinguir confiabilidade em três principais ramos: confiabilidade humana; confiabilidade de hardware e confiabilidade de software (estas últimas compreendendo a confiabilidade de componentes e sistemas técnicos).

Na área médica, a análise de confiabilidade é denominada análise de sobrevivência.

A análise de sobrevivência é umas das áreas que mais cresceu nas últimas décadas, muito em função do desenvolvimento e aprimoramento de técnicas estatísticas e da evolução da informática, com computadores cada vez mais velozes (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

Na análise de confiabilidade, ou análise de sobrevivência, a variável resposta é, na maioria dos casos, o tempo até a ocorrência de um evento de interesse. Esse tempo é chamado “tempo de falha”, podendo ser o tempo até a morte do paciente, tempo até a cura de uma doença (COLOSIMO; GIOLO, 2006); na manutenção, tempo entre falhas (quebra) do equipamento.

Convém caracterizar o conceito de falha, que muitas vezes é confundida com erro.

Em Rausand e Oien (1996), erro é uma discrepância entre um cálculo, uma observação, uma medida ou uma condição. Um erro não é uma falha, pois ele possui um limite aceitável de desvio em relação à sua performance esperada (valor alvo).

Para Rausand e Oien (1996) e Vaz (2003), falha é o termino da capacidade total ou parcial de uma peça, componente, equipamento ou sistema de desempenhar sua função, durante um período de tempo.

A distinção entre falha e erro é essencial na análise de falhas, pois descreve a fronteira entre o que é uma falha e o que não é (RAUSAND; OIEN, 1996).

Em Sellitto, Borchardt e Araújo (2002), pode-se observar que, para um item não reparável, a confiabilidade é a probabilidade de duração de desempenho isento de falhas sob certas condições operacionais e para um item reparável, confiabilidade é a probabilidade de desempenho isento de falhas durante um intervalo de tempo sob certas condições operacionais. Desse modo, confiabilidade é uma função probabilidade que varia ao longo do tempo.

3.1.1 A Função de Confiabilidade

Em vários tipos de estudos sobre manutenção e confiabilidade são utilizadas muitas definições matemáticas e distribuições de probabilidade (DHILLON, 2006, p.12).

De acordo com Ebeling (1997), na engenharia de confiabilidade uma falha pode ser descrita como um evento aleatório. Assim, um evento aleatório E ocorrerá com uma probabilidade denotada por $P(E)$, onde $0 \leq P(E) \leq 1$. Quanto mais próximo de 1 for $P(E)$, mais provável será a ocorrência do evento (por exemplo, falha).

Para Vaccaro (1997), através de um conjunto de funções, globalmente chamado, Funções de Confiabilidade, torna-se possível uma descrição do comportamento da confiabilidade de um produto, peça, componente ou sistema.

3.1.1.1 Função de Confiabilidade e Distribuição Acumulada de Falhas

A variável aleatória T , usualmente contínua, que representa o tempo de falha, é geralmente especificada por sua função de sobrevivência ou pela função taxa de falha (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

De acordo com Vaccaro (1997), a partir de um ambiente operacional previamente definido pelas condições de projeto, uma amostra composta por n_0 unidades idênticas será submetida a teste. Ao final de cada instante t , pode-se observar um certo número de unidades que falharam, $n_f(t)$, e um certo número de unidades sobreviventes, isto é, em condições operacionais, $n_s(t)$. Observe-se que, devido à natureza do teste - é um teste de sobrevivência -, a ocorrência de uma falha é associada a um sucesso em termos probabilísticos.

Por isso a função confiabilidade é também chamada, função de sobrevivência.

A função de confiabilidade é uma das principais funções probabilísticas usadas para descrever estudos de sobrevivência e é definida como a probabilidade de uma observação não falhar até um certo tempo t , ou seja, é possível determinar a probabilidade de sucessos de não falhas durante um tempo determinado (COLOSIMO; GIOLO, 2006; KECECIOGLU, 2002a).

$$R(t) = P(T \geq t) \quad (3.1)$$

Como consequência, tem-se que a função distribuição acumulada de falhas é definida como a probabilidade de uma observação não sobreviver ao tempo t .

$$F(t) = 1 - R(t), \quad t \geq 0 \quad (3.2)$$

3.1.1.2 Função Densidade de Probabilidade de Falhas

A função densidade de probabilidade de falha denotada por $f(t)$, permite determinar as probabilidades de falhas ao longo de um período de tempo (KECECIOGLU, 2002a).

Assumindo a hipótese de que a função confiabilidade é derivável e contínua em relação aos tempos de falha, em consequência, pela expressão (3.2), a função distribuição acumulada de falhas também será derivável. Sob esta hipótese, pode-se derivar a função

distribuição acumulada $F(t)$ de falhas para se obter a função densidade de probabilidade de falhas $f(t)$ (VACCARO, 1997).

$$f(t) = \frac{dF}{dt}(t), \quad t \geq 0 \quad (3.3)$$

Da mesma forma, chega-se à conclusão que:

$$\frac{dR}{dt}(t) = -\frac{dF}{dt}(t) = -f(t), \quad t \geq 0 \quad (3.4)$$

e, a partir daí (sob as mesmas hipóteses), tem-se:

$$F(t) = \int_0^t f(s).ds, \quad t \geq 0 \quad (3.5)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(s).ds, \quad t \geq 0 \quad (3.6)$$

3.1.1.3 Função Taxa de Risco ou Taxa de Falha

A função taxa de risco ou taxa de falha denotada por $h(t)$, é a probabilidade da falha ocorrer em um intervalo de tempo $[t_1, t_2]$, dado que não ocorreu até t_1 , em outras palavras, representa as proporções de falhas ocorrendo por unidade de tempo (COLOSIMO; GIOLO, 2006; KECECIOGLU, 2002a).

A probabilidade de falhas no intervalo $[t_1, t_2]$ pode ser expressa em termos da função confiabilidade como:

$$R(t_1) - R(t_2) \quad (3.7)$$

Assim, a taxa de falha no intervalo $[t_1, t_2]$ é expressa por:

$$\frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)} \quad (3.8)$$

De modo geral, pode-se representar o intervalo $[t_1, t_2]$ por $(t, t + \Delta t)$, isto é, $t_2 = t + \Delta t$ e a expressão (3.8) assume a seguinte forma:

$$h(t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)} \quad (3.9)$$

Assumindo um Δt bastante pequeno, $h(t)$ representa a taxa de falha instantânea, ou taxa de risco, no tempo t condicional à sobrevivência até o tempo t , isto é, ela descreve a forma em que a taxa instantânea de falha muda com o tempo (COLOSIMO; GIOLO, 2006; VACCARO, 1997).

Assim, pode-se achar da expressão (3.9), quando $\Delta t \rightarrow 0$, uma fórmula muito útil para a função de risco $h(t)$ dada por:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.10)$$

$$\text{onde: } \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t} = f(t)$$

Tobias e Trindade (2011), alertam para o fato de que nem todos os autores usam as mesmas definições quando estão falando sobre taxas de falha.

A função taxa de risco pode assumir uma forma (curva) de risco crescente (taxa de falha aumenta com o passar do tempo), constante (a taxa de falha não se altera com o passar do tempo) ou decrescente (a taxa de falha diminui com o passar do tempo).

Sabe-se que, em seres humanos, e em muitos produtos e componentes, o tempo de vida é uma combinação destas curvas em diferentes períodos de tempo, esta curva é denominada *curva da banheira* e possui uma alta taxa de falha no início de vida (fase infantil - mortalidade prematura), com taxa de risco decrescente, um período com uma taxa de risco relativamente constante (fase de vida útil) e um período de desgaste ou velhice (fase de desgaste), onde o risco apresenta uma taxa crescente (CARVALHO, 2012; COLOSIMO; GIOLO, 2006; DHILLON, 2006; EBELING, 1997; KECECIOGLU, 2002a; TOBIAS; TRINDADE, 2011).

3.1.1.4 Função Taxa de Falha Acumulada

De acordo com Colosimo e Giolo (2006), a função taxa de falha acumulada é outra função muito utilizada na análise de sobrevivência e, como seu próprio nome sugere, é a taxa de falha que acumula as falhas do indivíduo, tendo sua definição como:

$$H(t) = \int_0^t h(t) dt \quad (3.11)$$

3.1.2 Tempo Médio e Vida Média Residual

Tempo médio mede o tempo que um paciente, item, componente ou sistema sobrevive até a morte ou falha, ou seja, é o tempo médio de vida.

O $t(m)$ é obtido pela área sob a função de confiabilidade, ou seja:

$$t(m) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.12)$$

A vida média residual mede o quanto de vida ainda resta, em média, para um indivíduo, peça ou componente, dado que ele sobreviveu até t , ou seja, ela mede o tempo restante médio de vida e é, então a área sob a curva de confiabilidade à direita do tempo t dividida por $R(t)$ (COLOSIMO; GIOLO, 2006; TOBIAS; TRINDADE, 2011).

$$vmr = \frac{\int_t^{\infty} R(t)dt}{R(t)} \quad (3.13)$$

3.1.3 Tipos de Dados na Análise de Confiabilidade

A análise estatística de dados de confiabilidade é geralmente mais difícil e complicada que a análise de outros dados experimentais pela presença de dados censurados ou truncados (TOBIAS; TRINDADE, 2011).

Em um estudo de confiabilidade, nem todas as observações da amostra falham, ou os tempos entre falhas de todas as observações não são conhecidos, este tipo de dado é denominado censura ou suspenso (REIS, 2014).

Em conjuntos de dados onde não há dados censurados, técnicas estatísticas clássicas, (Análise de regressão, Planejamento de experimentos, Análise de variância, etc.), podem ser utilizadas para análise de dados de sobrevivência, provavelmente com alguma transformação na variável resposta (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

A falta dos dados censurados na análise, inviabilizará qualquer modelo desenvolvido, pois assume-se de forma equivocada, que todos os equipamentos ou sistemas falharam (REIS, 2014).

Somente com o uso de métodos de análise de sobrevivência é possível analisar dados na presença de censuras, assim, a presença de dados censurados é a principal característica do estudo de dados de sobrevivência (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

Mas por que técnicas estatísticas clássicas não são adequadas para o estudo de dados de sobrevivência na presença de censuras?

Bem, para Colosimo e Giolo (2006) e Tobias e Trindade (2011), na análise estatística descritiva clássica, o principal objetivo é se encontrar medidas de tendência central e de variabilidade, a presença de censuras inviabiliza este tipo de tratamento aos dados de sobrevivência. O principal componente na análise descritiva de dados de tempo de vida é a função sobrevivência, então o passo inicial é encontrar uma estimativa para a função de sobrevivência e então, a partir dela, estimar as estatísticas de interesse, como tempo médio, frações de falhas em tempos fixos de acompanhamento, etc.

Pode-se observar os seguintes tipos de censuras: (COLOSIMO; GIOLO, 2006; TOBIAS; TRINDADE, 2011):

- i. Censura a Direita Tipo I: ocorre nos estudos que ao serem finalizados após um período de tempo pré-estabelecido, alguns indivíduos não apresentaram o evento de interesse;

- ii. Censura a Direita Tipo II: ocorre nos estudos que são finalizados após a ocorrência do evento de interesse em um número pré-estabelecido de indivíduos;
- iii. Censura Tipo Aleatório: ocorre nos estudos em que os indivíduos são retirados do estudo sem ter apresentado o evento de interesse. Este tipo de censura é mais comum na prática médica, onde um paciente é retirado do estudo sem apresentar o evento de interesse (paciente não pode ser mais contatado) ou por que veio a falecer por razão diferente da estudada;
- iv. Censura a Esquerda: ocorre em estudos onde o tempo registrado é maior que o tempo de falha, isto é, o evento de interesse já havia acontecido quando o indivíduo foi observado;
- v. Censura Intervalar: ocorre em estudos onde os indivíduos são acompanhados em visitas periódicas e é conhecido somente que o evento de interesse ocorreu em um certo intervalo de tempo, ou seja, o tempo exato de falha não é conhecido.

O caso mais comum de dados censurados na análise de confiabilidade é a censura a direita, isto é, quando ao fim de um ensaio realizado, ainda existem equipamentos ou sistemas que não falharam, ou seja, ao fim do período de tempo definido para a coleta de dados, ainda há equipamentos funcionando em perfeito estado e que devem ser considerados no estudo, contribuindo para a análise de confiabilidade (REIS, 2014).

3.1.4 Modelos de Confiabilidade

Na análise de sobrevivência ou análise de confiabilidade, há dois tipos de modelos de análise: (i) modelos não-paramétricos, onde não é necessária a especificação de nenhuma distribuição de probabilidade para os dados de tempo de vida de um componente ou sistema (RAUSAND, 1994); (ii) modelos paramétricos ou probabilísticos, onde é necessária a especificação de uma distribuição de probabilidade adequada aos dados (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

O uso de métodos não-paramétricos nos permite ganhar perspectiva quanto a natureza da distribuição de dados a partir do qual foi desenhada sem, no entanto, selecionar uma distribuição específica (LEWIS, 1994).

Para Colosimo e Giolo (2006), o uso de técnicas paramétricas tem sido mais frequente na área industrial que na área médica, razão pela qual, na indústria os estudos envolvendo

componentes e equipamentos podem ser planejados e, fontes de perturbação, podem ser controladas.

Este trabalho terá o foco concentrado na análise de confiabilidade de modelos paramétricos.

A pesar de algumas distribuições de probabilidade serem, certamente, mais conhecidas, como a Normal e a Binomial, quando se trata de descrever a variável “tempo entre falhas”, outras distribuições mostram-se mais adequadas. E, embora haja uma variedade de modelos probabilísticos utilizados na análise de sobrevivência, alguns ganham posição de destaque, por apresentarem comprovada adequação em distintas situações. Pode-se citar os modelos Exponencial, Weibull e o Log-normal (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

A seguir são apresentadas algumas das principais distribuições de probabilidade usadas na análise de confiabilidade.

3.1.4.1 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é a forma mais simples para descrever tempos de falha. A distribuição é caracterizada por uma função risco constante dada por,

$$\lambda(t) = \frac{1}{\alpha}, \quad t \geq 0, \quad \alpha > 0, \quad (3.14)$$

Em que α é o tempo médio de vida.

A função risco é conhecida também como a taxa de falha instantânea, se caracterizando, nesta distribuição pelo fato de ser independente de t , ou seja, a chance de falha em um intervalo de tempo não depende do tempo que o objeto permanece no estudo (falta de memória). A função de sobrevivência $S(t)$ é dada por:

$$S(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)\right\}. \quad (3.15)$$

A função densidade de probabilidade para a variável aleatória tempo de falha T com distribuição exponencial é dada por,

$$f(t) = \frac{1}{\alpha} \exp\left\{-\frac{t}{\alpha}\right\}, \quad t \geq 0. \quad (3.16)$$

Denota-se a distribuição exponencial (3.16) por $T \sim Exp(\alpha)$.

3.1.4.2 Distribuição de Weibull

A distribuição Weibull, amplamente conhecida em virtude de sua simplicidade e flexibilidade em acomodar diferentes formas de função de risco, é talvez o modelo de

distribuição mais utilizado em análise de tempos de vida. Para uma variável aleatória T com distribuição Weibull, a função de densidade de probabilidade é dada por:

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta^\gamma} t^{\gamma-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma\right\}, \quad t \geq 0, \quad (3.17)$$

em que t é o tempo até a falha, γ é o parâmetro de forma e θ o de escala, todos positivos. O parâmetro θ tem a mesma unidade de medida de t e γ é adimensional.

Denota-se a distribuição Weibull (3.17) por: $T \sim Wei(\gamma, \theta)$

O parâmetro γ é chamado de declividade de Weibull, pois determina a declividade da função de distribuição acumulada. É denominado parâmetro de forma porque variações em seu valor alteram drasticamente o comportamento da distribuição.

O parâmetro θ é denominado de escala porque variações em seu valor (mantendo γ constante) causam a compressão ou expansão da curva da função densidade de probabilidade.

Existem diversos métodos de estimativa desses parâmetros e de seus intervalos de confiança (MENON, 1963). Para mais detalhes, ver seção 3.1.5.

Para a distribuição de Weibull, a função de sobrevivência $R(t)$ é:

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma\right\} \quad (3.18)$$

e tem taxa de falha igual a:

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta^\gamma} t^{\gamma-1}, \quad (3.19)$$

para $t \geq 0$, γ e $\theta > 0$.

A forma da curva de sobrevivência é determinada exclusivamente pelo parâmetro γ . Se a população considerada tem taxa de falha que aumenta com o tempo, o valor de γ será maior que 1. Para taxa de falha constante, o valor de γ será igual a 1. E se a taxa de falha for decrescente com o tempo, o valor de γ será menor que 1.

Neste caso, pode-se ter riscos (taxas de falha) crescentes para $\gamma > 1$; decrescentes para $\gamma < 1$ e constante para $\gamma = 1$.

As equações para o tempo médio de vida $E(T)$ e a variância $Var(T)$ do modelo de Weibull consideram os parâmetros γ e θ e incluem o uso da função gama, isto é,

$$E(T) = \theta \Gamma\left[1 + \left(\frac{1}{\gamma}\right)\right], \quad (3.20)$$

$$Var(T) = \theta^2 \left[\Gamma\left[1 + \left(\frac{2}{\gamma}\right)\right] - \Gamma\left[1 + \left(\frac{1}{\gamma}\right)\right]^2 \right], \quad (3.21)$$

sendo a função gama, $\Gamma(k)$, definida por:

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} x^{k-1} \exp\{-x\} dx \quad (3.22)$$

O percentil $100p\%$, ou vida residual, é dado por:

$$P(T \leq t_p) = t_p = \theta[-\ln(1-p)]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (3.23)$$

onde p é o percentil em que ocorrem as falhas, t_p é o provável tempo em que $p\%$ das falhas ocorrerão.

Pode-se encontrar na literatura várias convenções utilizadas para os parâmetros de forma e de escala da distribuição Weibull dependendo do autor. Na Tabela 1 são apresentadas algumas destas convenções encontradas na literatura.

Tabela 1 – Convenções utilizadas para os parâmetros de forma e escala da distribuição de Weibull encontradas na literatura

Autor	Parâmetro de forma	Parâmetro de escala
Colosimo; Giolo (2006)	γ	α
Sellitto (2005)	γ	θ
Sellitto; Borchardt; Araújo (2002)	γ	θ
Ramos et al. (2014)	γ	θ
Cerveira; Sellitto (2015)	γ	θ
Liberopoulos; Tsarouhas (2005)	β	θ
Ebeling (1997)	β	θ
Dhillon (2002)	b	α
Ireson; Coombs; Moss (1995)	β	α
Tobias; Trindade (2011)	β	α
Kececioglu (2002a)	β	η
Rausand (1994)	α	λ

Fonte: Próprio autor

Este trabalho seguirá a convenção dos parâmetros de forma e escala para a distribuição de Weibull apresentada em Sellitto (2005).

Sellitto (2005) relaciona as fases do ciclo de vida da curva da banheira com os valores do parâmetro de forma γ de Weibull, que representa o comportamento da curva de falhas do equipamento, elencando os tipos de falhas mais comuns encontradas em cada fase, a saber:

- Na fase de mortalidade infantil, onde $\gamma < 1$, a taxa de falhas é alta, porém decrescente ao longo do tempo. As falhas são prematuras, normalmente originadas por deficiências no processo de fabricação, instalação incorreta, ou materiais fora de especificação.
- Já na fase de maturidade, onde $\gamma = 1$, a taxa de falhas é sensivelmente menor e oscila ao redor de uma média constante. As falhas são casuais e decorrentes de

fatores menos controláveis, tais como: mau uso do equipamento, ultrapassagem de resistência ou fenômenos naturais imprevisíveis.

- E por fim, na fase de mortalidade senil ou desgaste, em que $g > 1$, a taxa de falhas é crescente. Essas falhas são causadas por envelhecimento, degradação mecânica, elétrica ou química, fadiga, corrosão, ou vida de projeto muito curta. É o fim da vida útil do equipamento.

3.1.4.3 Distribuição Log-normal

A distribuição log-normal é muito usada em ciências físicas e sociais e em engenharia, neste último caso para descrever o tamanho de partículas, o tempo para haver uma falha no processo (confiabilidade) e o tempo para consertar algo no processo (manutenção).

Uma variável T , definida na faixa $0 < t < \infty$, tem uma distribuição log-normal se $\ln(T)$ for normalmente distribuída com média e desvio-padrão dados por:

$$\begin{aligned}\mu_{\ln T} &= E(\log(T)) \\ \sigma_{\ln T}^2 &= Var(\log(T))\end{aligned}\quad (3.24)$$

A função densidade de probabilidade de T é expressa por:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right)^2\right\}, \quad t > 0, \quad (3.25)$$

onde μ é a média do logaritmo do tempo de falha e σ é o desvio padrão.

Para a distribuição Log-normal, a função de sobrevivência $R(t)$ é:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{-\log(t) + \mu}{\sigma}\right) \quad (3.26)$$

O tempo médio de vida $E(T)$ e a variância $Var(T)$ são calculados por:

$$E(T) = \exp\left\{\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right\} \quad (3.27)$$

$$Var(T) = \{2\mu + \sigma^2\}(\exp\{\sigma^2\} - 1) \quad (3.28)$$

O percentil 100 p %, ou vida residual, pode ser obtido a partir da tabela da normal padrão a partir de:

$$tp = \exp\{z_p\sigma + \mu\} \quad (3.29)$$

3.1.4.4 Distribuição Gama

Essa distribuição também inclui a exponencial como um caso especial. A função de densidade da distribuição gama, que é caracterizada por dois parâmetros, k e α , em que $k > 0$ é chamado parâmetro de forma e $\alpha > 0$ de escala, e é expressa por:

$$f(t) = \frac{1}{\Gamma(k)\alpha^k} t^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)\right\}, \quad t > 0, \quad (3.30)$$

Com $\Gamma(k)$ definida por $\Gamma(k) = \int_0^{\infty} x^{k-1} \exp\{-x\} dx$.

A função de sobrevivência é dada por,

$$S(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\Gamma(k)\alpha^k} u^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{u}{\alpha}\right)\right\} du. \quad (3.31)$$

A função de taxa de falha, obtida da relação $\lambda(t) = f(t)/S(t)$, apresenta um padrão crescente ou decrescente, no entanto, convergindo para um valor constante quando t tende a infinito.

Denota-se a distribuição Gama (3.30) por $T \sim \text{Gama}(k, \alpha)$.

Um modelo de regressão bastante utilizado na análise de dados de sobrevivência na presença de covariáveis é o Modelo de Regressão de Cox (Cox, 1972). A razão de o modelo ser muito utilizado, principalmente na área médica, é a presença do componente não paramétrico que o torna bastante flexível. Vale mencionar que este é também denominado como modelo de riscos proporcionais, pois a razão de taxas de falha de dois indivíduos é constante no tempo, sendo esta situação um pressuposto do modelo.

3.1.4.5 Modelo de Regressão de Cox

Diferentes modelos de regressão são introduzidos na literatura para analisar dados de sobrevivência na presença de dados censurados e covariáveis.

De acordo com Colosimo e Giolo (2006), estes modelos são conhecidos como modelo de tempo de vida acelerado, pois a função das covariáveis é acelerar ou desacelerar o tempo de vida. Alguns desses modelos de regressão assumem uma distribuição paramétrica (por exemplo, regressão exponencial, regressão Weibull ou regressão log-normal). Outros modelos de regressão não assumem uma distribuição paramétrica para os dados de sobrevivência.

Para Colosimo e Giolo (2006), a parte inferencial e seu correspondente aspecto computacional, tornam os modelos paramétricos complexos.

Um modelo de regressão não-paramétrico bastante utilizado na análise de dados de sobrevivência na presença de covariáveis é o Modelo de Regressão de Cox (Cox, 1972). A razão de o modelo ser muito utilizado, principalmente na área médica, é a presença do componente não paramétrico que o torna bastante flexível. Vale mencionar que este é também

denominado como modelo de riscos proporcionais, pois a razão de taxas de falha de dois indivíduos é constante no tempo, sendo esta situação um pressuposto do modelo. Esse modelo é também denominado como um modelo semi-paramétrico. Para mais detalhes, ver por exemplo, Colosimo e Giolo (2006).

3.1.5 Estimação dos Parâmetros dos Modelos

Os modelos apresentados na seção 3.1.4 são caracterizados por parâmetros que conferem uma forma geral aos modelos probabilísticos. Estes parâmetros devem ser estimados a partir dos dados das observações das amostras para que o modelo fique determinado, possibilitando assim, responder as perguntas de interesse (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

Para Colosimo e Giolo (2006), um dos métodos mais conhecidos na literatura estatística para estimação de parâmetros é o método de mínimos quadrados. Porém, por sua incapacidade de incorporar censuras em seu processo de estimação, este é inadequado para estudos de tempo de vida, assim, o método de máxima verossimilhança surge como uma opção apropriada para este tipo de dados, pois, além de incorporar censuras, é simples de se entender e possui propriedades ótimas para grandes amostras (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

3.1.5.1 O Método de Máxima Verossimilhança

O método de máxima verossimilhança funciona da seguinte forma: com base nos dados da amostra, qual é a distribuição, entre todas aquelas definidas pelos possíveis valores de seus parâmetros, com a maior probabilidade de ter gerado a amostra?, ou seja, se distribuição do tempo de falha é a distribuição Weibull, para cada combinação diferente de γ e θ , tem-se diferentes distribuições de Weibull, assim, o estimador de máxima verossimilhança escolhe aquele par de γ e θ que melhor explique a amostra observada (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

A seguir, o método de máxima verossimilhança é traduzido para conceitos matemáticos.

Supor uma amostra de observações não censuradas t_1, \dots, t_n de uma população, onde os tempos de sobrevivência tenham uma densidade $f(t; \theta)$, onde θ é um parâmetro desconhecido. A função de verossimilhança para o parâmetro θ é dada por:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i; \theta). \quad (3.32)$$

Na expressão (3.32), θ pode estar representando um único parâmetro ou um vetor de parâmetros (ver, por exemplo, Colosimo e Giolo (2006)).

Para definir a verossimilhança para dados censurados, considere T uma variável aleatória representando o tempo de falha de um paciente e C uma variável aleatória, independente de T , representando o tempo de censura. Para o paciente tem-se que, $t = \min(T, C)$ e

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{se } T \leq C \\ 0 & \text{se } T > C \end{cases} . \quad (3.33)$$

Supor que os pares (T_i, C_i) , para $i=1, \dots, n$ formam uma amostra aleatória de n pacientes.

As observações podem ser divididas em dois conjuntos, as r primeiras observações ordenadas são as observações não censuradas $(1, 2, \dots, r)$ e as $n-r$ seguintes são observações censuradas $(r+1, r+2, \dots, n)$.

Para a censura do Tipo I, considere r falhas e $n-r$ censuras observadas ao término do experimento; portanto $L(\theta)$ é dada por:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^r f(t_i; \theta) \prod_{i=r+1}^n S(t_i; \theta). \quad (3.34)$$

Onde o segundo termo tem a forma $\prod_{i=r+1}^n S(c; \theta) = [S(c; \theta)]^{n-r}$, quando todos tempos censurados forem iguais a c . Observar que r é aleatório.

Para dados com censura do Tipo II, somente os r menores tempos são observados e r é fixo. Assim $L(\theta)$ é dada por:

$$L(\theta) = \frac{n!}{(n-r)!} \prod_{i=1}^r f(t_i; \theta) \prod_{i=r+1}^n S(t_i; \theta). \quad (3.35)$$

Em que $\prod_{i=r+1}^n S(t_i; \theta) = [S(t_r; \theta)]^{n-r}$ com t_r o maior tempo observado. Como o termo $\frac{n!}{(n-r)!}$ é uma constante e não depende de nenhum parâmetro, pode ser desprezado.

Então se tem:

$$L(\theta) \propto \prod_{i=1}^r f(t_i; \theta) \prod_{i=r+1}^n S(t_i; \theta). \quad (3.36)$$

Para censura aleatória, T é considerado tempo de falha e C o de censura. Para $i = 1, \dots, n$, os dados observados consistem, ainda, dos pares (t_i, δ_i) , em que $t_i = \min(T_i, C_i)$ e $\delta_i = 1$ se $T_i \leq C_i$ ou $\delta_i = 0$ se $T_i > C_i$. Considerando os tempos de falhas e de censura independentes

e supondo $g(c)$ e $G(c)$ as funções de densidade e de sobrevivência de C , respectivamente, então se para i -ésimo indivíduo,

(a) for observada uma censura, segue que:

$$P(t_i = t, \delta_i = 0) = P(C_i = t, T_i > C_i) = P(C_i = t, T_i > t) = g(t) S(t; \theta)$$

(b) e, se for observada uma falha,

$$P(t_i = t, \delta_i = 1) = P(T_i = t, T_i \leq C_i) = P(T_i = t, C_i \geq t) = f(t; \theta) G(t)$$

Desta forma,

$$L(\theta) \propto \prod_{i=1}^r f(t_i; \theta) G(t_i) \prod_{i=r+1}^n g(t_i) S(t_i; \theta). \quad (3.37)$$

Sob a suposição de que o mecanismo de censura é não-informativo, ou seja, não carrega informações sobre os parâmetros, os termos $G(t)$ e $g(t)$ podem ser desprezados, pois não envolvem θ , e, sendo assim, a função de máxima verossimilhança é dada por:

$$L(\theta) \propto \prod_{i=1}^r f(t_i; \theta) \prod_{i=r+1}^n S(t_i; \theta). \quad (3.38)$$

Para Colosimo e Giolo (2006), é sempre conveniente trabalhar com o logaritmo da função de máxima verossimilhança. Os estimadores são os valores de θ que maximizam $L(\theta)$, ou seu equivalente $\log(L(\theta))$ e, são encontrados resolvendo-se o seguinte sistema de equações:

$$U(\theta) = \frac{\partial \log L(\theta)}{\partial \theta} = 0. \quad (3.39)$$

3.1.5.2 Verificação de Adequação de Ajustes

A escolha do modelo a ser utilizado é um tópico extremamente importante na análise paramétrica de dados de tempo de vida. Por exemplo, se o modelo Log-normal for usado inadequadamente para um certo conjunto de dados, toda a análise estatística fica comprometida (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

Mas porque usar o modelo Log-normal e não o de Weibull? Algumas vezes existem evidências provenientes de testes realizados no passado de que um certo modelo se ajusta bem aos dados. No entanto, em muitas situações este tipo de informação não está disponível. A solução para estas situações é basicamente empírica. Sabe-se que as distribuições apresentadas na seção 3.1.4 são típicas para dados de tempos de vida. A proposta empírica consiste em ajustar os modelos probabilísticos apresentados (Exponencial, Weibull etc.) e, com base na comparação entre valores estimados e observados, decidir qual deles melhor

"explica" os dados amostrais (COLOSIMO; GIOLO, 2006). A forma mais simples e eficiente de selecionar o "melhor" modelo a ser usado para um conjunto de dados é através de técnicas gráficas (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

Um método de verificação de ajuste simples e muito usado na análise de dados de sobrevivência consiste na linearização da função de sobrevivência tendo como ideia básica a construção de gráficos que sejam aproximadamente lineares caso o modelo proposto seja apropriado. Violações da linearidade podem ser rapidamente verificadas visualmente. O gráfico utilizado é o de uma transformação que lineariza a função de sobrevivência do modelo proposto. Isto gera como resultado final, uma reta se o modelo proposto for adequado. Esses gráficos são dados automaticamente em vários softwares estatísticos, por exemplo, o software Minitab®. Para mais detalhes dessas técnicas ver por exemplo, Colosimo e Giolo (2006).

Outra possibilidade na verificação de ajuste de uma distribuição de probabilidade seria o uso de testes de aderência não-paramétricos, como por exemplo testes de Kolmogorov e Smirnov ou testes qui-quadrado de Pearson. Devido a mínima exigência de suposições sobre a natureza (distribuição) dos dados, estes métodos são mais simples de se utilizar, no entanto, por esta simplicidade, pode-se haver perda de informação. Por isso, em trabalhos aplicados, as técnicas gráficas são mais utilizadas na literatura para verificação do ajuste de um modelo estatístico.

4 ESTUDO DA CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E DISPONIBILIDADE NA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

Esta seção inicia com a revisão de artigos e trabalhos publicados em uma ampla gama de periódicos e base de dados de revistas, teses e dissertações, incluindo Emerald, EbscoHost (Taylor & Francis), Sciencedirect (Elsevier), Scopus, SAGE, SpringerLink, Wiley InterScience, Compendex, que representa as principais publicações de revistas nas áreas de gestão, engenharia, operações, produção, fabricação, qualidade e confiabilidade e manutenção.

Também foram pesquisadas bibliotecas virtuais de teses e dissertações como SBU (Unicamp), SIBi (USP), Teses USP, Athena (UNESP), Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD).

Por fim foram pesquisadas as bases de referências do Google Acadêmico, Periódicos CAPES, Directory Of Open Access Journals (DOAJ) e Scielo Brasil.

Na tentativa de manter as descobertas contemporâneas, a busca por evidências empíricas ligando modelos de confiabilidade aplicados a estratégia de manutenção, a pesquisa foi restrita a trabalhos publicados no período de 2000 e 2016. Cada banco de dados foi pesquisado utilizando palavras-chave (em português e inglês) como: *Confiabilidade, Manutenção, Modelos de Manutenção, Estratégia de Manutenção, Funções de Confiabilidade, Sistemas Reparáveis, Manutenibilidade, Disponibilidade, Engenharia de Manutenção e Engenharia de Confiabilidade*.

Inicialmente se fez a triagem dos estudos pela leitura não estrutura dos títulos e resumos, buscando aqueles que apresentassem melhor alinhamento aos temas de estudo deste trabalho. Posteriormente fez-se a leitura superficial dos trabalhos inicialmente selecionados, buscando aqueles que apresentassem melhor adequação aos objetivos do presente estudo. Algumas teses, dissertações e livros publicados antes do período de 2000 a 2016, que foram encontradas como referências em alguns dos estudos selecionados, também foram incluídos como referencial para esta dissertação por apresentarem contribuição teórica bastante relevante.

Confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade tem papel importante no sucesso das empresas. Custos altos motivam a busca de soluções de engenharia para problemas de confiabilidade para reduzir gastos financeiros, aumentando a confiabilidade, satisfazendo os clientes com entregas pontuais através de maior disponibilidade de equipamentos e reduzindo custos e problemas resultantes de produtos que falham facilmente.

Com a pesquisa realizada nas bases de dados, foi evidenciado, assim como evidenciaram Tsarouhas, Arvanitoyannis e Ampatzis (2009), que a literatura sobre confiabilidade, manutenção, manutenibilidade e disponibilidade é bastante vasta, com um grande número de livros e artigos publicados.

Sellitto (2005) relata o uso da confiabilidade e da manutenibilidade na formulação de estratégias de manutenção através do estudo de dois casos em fábricas do setor metal-mecânico. O estudo inicia com uma revisão dos conceitos ligados a variáveis e processo aleatórios aplicados na gestão da manutenção industrial. Técnicas de modelagem de tempos entre falhas e de reparo foram utilizadas para o estabelecimento de estratégias de manutenção que teve como base o posicionamento dos equipamentos na curva do ciclo de vida (curva da banheira). Com base nos resultados, estabeleceu condições para o uso da confiabilidade na formulação estratégica da manutenção. Como resultado de seu estudo, o autor relaciona para cada fase do ciclo de vida da curva banheira uma estratégia de manutenção e cada fase do ciclo de vida da curva da banheira com o comportamento da taxa de falha do equipamento.

Sellitto (2007) relata a aplicação da análise estratégica da manutenção em uma linha de produção metal-mecânica com base em estudos de confiabilidade sistêmica e de equipamentos individuais. Inicia o estudo descrevendo algumas características do uso da confiabilidade na manutenção industrial e, em seguida, através de um estudo de caso descritivo, apresentou e testou um método quantitativo e objetivo para a formulação de estratégias de manutenção de equipamentos complexos de produção, que podem ou não fazer parte de uma linha de produção. A aplicação do método indicou a estratégia de manutenção preventiva para quatro das seis máquinas estudadas, em duas delas de forma pura, em outras duas, de forma combinada com a estratégia preditiva. Pôde-se com isso calcular intervalos ótimos de intervenção, gerando ganho de escala no serviço e redução no custo de manufatura. Em uma máquina, chegou-se a uma estratégia de manutenção preditiva pura e em outra máquina não se pôde descartar nenhuma das estratégias. Apenas uma das máquinas requer a estratégia de manutenção corretiva, o que pode indicar um ponto frágil na linha de produção quanto ao projeto da máquina ou quanto a aplicação que lhe foi designada no projeto da linha, sendo necessária identificar as fragilidades do projeto e corrigi-las, o que pode contribuir para o aumento da confiabilidade, gerando aumento na competitividade em manufatura.

Mengue e Sellitto (2013) definiram a estratégia de manutenção mais adequada para uma bomba centrífuga instalada em uma planta petrolífera (escolhida entre estratégia de manutenção preventiva, preditiva, corretiva ou emergencial), baseada na modelagem de cálculos de confiabilidade e na definição da posição no ciclo de vida da curva da banheira

deste equipamento tecnológico complexo, sujeito ao desgaste e a intervenções incompletas de manutenção. O método contribuiu para verificar que a estratégia de manutenção preditiva, utilizada neste equipamento pela empresa, não está adequada para a sua posição na curva da banheira. A modelagem da confiabilidade apontou que o equipamento se encontra na fase de mortalidade infantil, o que sugere a estratégia de manutenção corretiva, a qual busca eliminar as reais causas dos possíveis defeitos de fabricação ou de projeto do equipamento.

Diedrich e Sellitto (2014) avaliaram a coerência das atuais estratégias de manutenção aplicadas a um equipamento crítico instalado em uma empresa da indústria de bebidas. Com o uso de um estudo de caso, aplicaram os conhecimentos da RCM (*Reliability Centered Maintenance*) e técnicas de modelagem aos tempos entre falhas (TBF – *time between failures*) e tempos de reparo (TTR – *time to repair*) em uma sopradora de garrafas PET em uma linha de produção de refrigerantes. O resultado da modelagem apontou que o equipamento se encontra na fase de mortalidade infantil, o que sugere a estratégia de manutenção corretiva para se identificar e corrigir as falhas de origem. A atual estratégia de manutenção empregada neste equipamento é a manutenção preventiva, com inspeções rotineiras e troca de componentes que ainda não falharam. A principal contribuição do estudo é a sugestão da adoção da estratégia de manutenção corretiva no equipamento, não necessariamente desativando a estratégia de manutenção preventiva.

Machado e Andrade (2013) apresentam a aplicação da análise de confiabilidade em diferentes grupos de equipamentos do processo produtivo de uma empresa do setor metal-mecânico automotivo, a fim de subsidiar as atividades de manutenção do setor. Durante três meses foram coletados os tempos entre falhas, os tempos de reparo e os principais modos de falha incidentes em diferentes equipamentos que são empregados no processo de fabricação de bombas hidráulicas automotivas: as operatrizes (equipamentos de usinagem bruta, responsáveis por deixar a carcaça com as dimensões ideais para montagem) e as automatizadas (equipamentos de montagem dos componentes internos do produto). Com base nos dados de falha foi realizada a análise de confiabilidade a fim de estabelecer quais procedimentos de manutenção (estratégias) são os mais adequados para cada tipo de equipamento, considerando o seu comportamento em relação as falhas (curvas de falha para cada modo de falha). Através dos resultados obtidos pode-se observar que na análise destes dois tipos distintos de equipamentos os tipos de manutenção tendem a ser diferenciados para ambos os casos. Os equipamentos voltados para automação, com sistemas mais frágeis e complexos, tendem a apresentar taxas de falhas mais estáveis, requerendo o uso de inspeções para seu funcionamento adequado. Já os equipamentos operatrizes, de usinagem pesada,

característico de sistemas robustos, apresentam perspectivas de crescimento das taxas de falha, correspondendo com o atual grau de degradação destes equipamentos. Os resultados mostraram a importância da realização de uma análise sistêmica de falhas para o estabelecimento de ações estratégicas de manutenção customizadas para os equipamentos analisados.

Santos e Sellitto (2016) utilizaram a modelagem de confiabilidade para propor uma estratégia de manutenção e um conjunto de melhorias para o aumento da disponibilidade de um posto de compressão de gases residuais do processo de destilação do petróleo, composto por dois compressores (A e B) em uma refinaria da indústria petrolífera. Foram modelados os tempos de reparo (TTR) e tempos entre falhas (TBF) dos compressores individuais e do posto de compressão de gases como um todo. Com os valores médios de MTBF e MTTR foram calculadas as disponibilidades individuais dos compressores e do conjunto (32,4%, 83,3% e 96,7%, respectivamente). A análise das curvas de falha dos equipamentos apontou que, apesar de operarem há mais de 20 anos, ambos se encontram na fase de mortalidade infantil da curva da banheira. Isso ocorre em função da mudança de matéria-prima utilizada na planta, que nos últimos cinco anos, passou a processar óleo mais pesado originado no pré-sal, para o qual a instalação não foi projetada. Esta divergência pode ser caracterizada como falta de projeto, o que remete à estratégia de manutenção corretiva. Como resultado da pesquisa, uma lista de melhorias corretivas de projeto foi apresentada para aumentar a disponibilidade do posto e encerrar a fase de falhas prematuras. Os autores reforçam ainda que os dados que foram analisados se originaram do histórico gerenciado pela área de Engenharia de Manutenção da empresa, o que destaca a importância dos registros e da qualidade das informações para a análise estratégica.

Mendes e Ribeiro (2014) apresentam um método para desenvolver análises quantitativas que orientem a revisão ou elaboração de um plano de manutenção de equipamentos em um cenário de produção *just in time*. O método proposto contempla 8 etapas: i) identificar os equipamentos que influenciam a confiabilidade; ii) levantar as taxas de falhas; iii) classificar os equipamentos quanto ao efeito de suas falhas; iv) levantar os parâmetros de demanda da linha de produção; v) identificar as distribuições de probabilidade da demanda da linha e dos tempos entre falhas (TBF) e tempos de reparo (TTR) dos equipamentos; vi) simular a produção, falhas e manutenção utilizando o método de Monte Carlo, a fim de definir, através de métodos estocásticos, a probabilidade de a linha não atender a demanda diária de produção; vii) realizar a análise de sensibilidade a eventuais variações na demanda, MTBF e MTTR e viii) estabelecer a estratégia de manutenção e

intervalos entre manutenções preventivas. O método foi testado através de da aplicação em uma linha de rotulagem e enchimento de galões de uma empresa do setor de tintas e corantes. Como resultado da pesquisa, os autores argumentam que o método permitiu identificar com clareza os equipamentos e subconjuntos críticos na linha de produção, além de permitir a definição de uma estratégia de manutenção preventiva, em substituição a estratégia de manutenção corretiva adotada pela empresa.

Cerveira e Sellitto (2015) definiram, com o uso da modelagem quantitativa da análise de confiabilidade, uma estratégia de manutenção para um forno elétrico a indução instalada em uma fundição de aços especiais. O método utilizado é baseado na metodologia da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM). Foram coletados dados históricos referentes ao período entre janeiro e dezembro 2012 de tempo de reparo (TTR) e tempo entre falhas (TBF) do equipamento. O estudo indicou que o equipamento está na fase de maturidade da curva da banheira, que remete à estratégia de manutenção preditiva, o que evidencia que a atual estratégia de manutenção preventiva utilizada pela empresa não está adequada com a posição do equipamento no ciclo de vida. Conclui-se que análises quantitativas dos tempos entre falhas, tempos de reparo e da disponibilidade do equipamento podem ser importantes na definição da estratégia de manutenção da empresa, pois possibilitam aos gestores visualizarem o reflexo das ações de manutenção na disponibilidade do sistema.

Barabady e Kumar (2008) utilizaram um software de análise de confiabilidade para descrever a confiabilidade e a disponibilidade de equipamentos de uma mineradora no Iran, o resultado da análise apontou quais os equipamentos mais críticos do ponto de vista da confiabilidade e os mais críticos do ponto de vista da disponibilidade, além de demonstrar que a análise de confiabilidade é muito útil para a decisão de intervalos de manutenções.

São encontrados poucos trabalhos de análise de confiabilidade e manutenção industrial ligados a indústria alimentícia, alguns destes, também utilizados neste estudo são citados aqui.

Liberopoulos e Tsarouhas (2005) utilizaram a análise estatística de falhas de uma linha de produção automatizada de pizza para identificar as falhas mais importantes (modos de falhas), computar os parâmetros de uma distribuição que melhor descrevesse os dados de falhas (curvas de sobrevivência e curvas de falha) e investigar a existência de autocorrelações e correlações cruzadas entre os dados de falhas. As análises ajudaram na melhoria do planejamento das linhas de produção.

Tsarouhas, Arvanitoyannis e Ampatzis (2009) através da análise de confiabilidade em uma empresa grega de sucos em garrafa, identificaram os modos de falhas mais importantes e determinaram os parâmetros da distribuição de probabilidade que melhor descreve os dados

de falhas (curvas de sobrevivência e curvas de falhas). A modelagem da confiabilidade, manutenibilidade e taxa de falhas foi desenvolvida para as máquinas, estações de trabalhos e também no nível de toda a linha de produção. Os autores argumentam que o uso da análise de confiabilidade provou-se ser uma ótima ferramenta para analisar tanto a condição atual dos equipamentos quanto prever a confiabilidade para atualização das políticas e estratégias de manutenção da linha de produção.

Tsarouhas, Varzakas e Arvanitoyannis (2009) propuseram um modelo de análise de confiabilidade para uma linha de produção de strudel. A análise foi conduzida nos níveis de máquinas, estações de trabalho e toda a linha de produção. Foram modelados os dados de tempo entre falhas e tempo de reparo. O modelo proposto pôde ser útil para analisar a condição atual dos equipamentos e para prever a confiabilidade dos mesmos, melhorando as políticas de manutenção da linha de produção. Com 93,76% de disponibilidade da linha de produção e um índice de eficiência de 85,52% (taxa de produtividade da linha), os autores concluem que a linha de produção apresenta rentabilidade marginal, pois, segundo os autores, é sabido que uma linha de produção é rentável quando apresenta taxa de produção acima de 85%.

Tsarouhas, Arvanitoyannis e Varzakas (2009) propuseram um modelo de análise de confiabilidade para uma linha de produção de queijo tipo feta em uma empresa de médio porte na Grécia. O modelo foi útil como uma ferramenta para análise da situação atual e previsão da confiabilidade para atualização das estratégias de manutenção da linha de produção. A análise também foi útil para identificação de problemas no processo de produção de queijos e, eventualmente, na resolução dos mesmos.

Para Tsarouhas (2012), técnicas de análise de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade na indústria alimentícia são ferramentas que podem aumentar a performance e a produtividade das linhas de produção, auxiliar na avaliação do impacto das falhas e propor mudanças na gestão de operações. Além disso, modelos de confiabilidade e a análise do comportamento das curvas de falhas provaram-se ser úteis na análise da condição atual e prever a confiabilidade para atualização das estratégias de manutenção de equipamentos.

5 MÉTODO CIENTÍFICO

O método científico é um meio de acesso para descobrir a realidade dos fatos, que quando descobertos, devem guiar o uso do método. Todo método depende do objetivo de investigação (CERVO; BERVIAN, 2002).

Ainda para Cervo e Bervian (2002), o resultado do método depende do usuário, isto é, só a inteligência e a reflexão do cientista descobrem o que os fatos e os fenômenos realmente são.

Para Cauchick Miguel (2012), a escolha do método é uma das decisões fundamentais na condução de um processo de pesquisa.

É através da pesquisa científica, mediante o uso de métodos científicos, que se descobre respostas para questões propostas (CERVO; BERVIAN, 2002; MARCONI; LAKATOS, 2002; SELTZ et al., 1995 apud MARCONI; LAKATOS, 2002).

De acordo com Cauchick Miguel (2012), para que a pesquisa seja classificada como científica, ela deve avançar no conhecimento já existente e não criar conhecimento descolado do que já se sabe e já foi comunicado através da literatura especializada.

5.1 Tipos de Pesquisa

Para Marconi e Lakatos (2002), os critérios para classificação dos tipos de pesquisa variam com o enfoque dado pelo autor.

Do ponto de vista de sua natureza, pode-se encontrar em Marconi e Lakatos (2002) e em Cervo e Bervian (2002) dois tipos de pesquisa:

- a. **Pesquisa básica, pura ou fundamental:** procura o progresso científico, a ampliação de conhecimentos teóricos, sem a preocupação de aplicá-la na prática. É a pesquisa formal, tendo em vista generalizações, princípios e leis, onde o pesquisador tem como meta o saber, buscando satisfazer a uma necessidade intelectual pelo conhecimento.
- b. **Pesquisa aplicada:** o investigador é movido pela necessidade de contribuir para fins práticos, buscando soluções para problemas concretos, isto é, que os resultados sejam aplicados e utilizados, imediatamente, na solução de problemas que ocorrem na realidade.

Para Cervo e Bervian (2002) ambas pesquisas são indispensáveis para o progresso da ciência e do homem e não se excluem, nem se opõem. Uma busca a atualização de

conhecimentos para uma nova tomada de posição, e a outra, além disso, transformar em ação concreta os resultados do trabalho.

Neste sentido, pode-se classificar este trabalho como sendo de natureza aplicada, pois os resultados serão aplicados na escolha da estratégia de manutenção mais adequada para os equipamentos da empresa estudada.

Quanto ao seu tipo, as pesquisas classificam-se, de acordo com Marconi e Lakatos (2002) em: Histórica, Descritiva, Experimental e Estudo exploratório e, em Cervo e Bervian (2002) como: Bibliográfica, Descritiva, Experimental, Estudos exploratórios, Resumo de assunto e Seminário de estudo.

- a. **Histórica ou Bibliográfica:** “descreve o que era”. O processo enfoca aspectos de investigação, registro, análise e interpretação de fatos ocorridos no passado, para, por meio de generalizações, compreender o presente e prever o futuro. Procura explicar um problema a partir de referências teóricas publicadas em documentos e pode ser realizada independente ou como parte da pesquisa descritiva ou experimental.
- b. **Descritiva:** “delineia o que é”. Observa, registra, analisa e correlaciona fatos ou fenômenos atuais sem manipulá-los, objetivando o seu funcionamento no presente.
- c. **Experimental:** “descreve o que será”. Caracteriza-se por manipular diretamente as variáveis relacionadas com o objeto de estudo, dando importância às relações de causas e efeitos de um determinado fenômeno, ou seja, pretende dizer de que modo ou por que causas o fenômeno é produzido.
- d. **Estudos exploratórios:** enfatizam as descobertas de ideias e discernimentos. É normalmente o passo inicial no processo de pesquisa e não elaboram hipóteses a serem testadas no trabalho, limitando-se a definir objetivos e buscar mais informações sobre determinado assunto.
- e. **Resumo de assunto:** texto que reúne e analisa e discute conhecimentos e informações já publicadas. Não é um trabalho original, mas exige a aplicação dos mesmos métodos científicos utilizados no trabalho científico original.
- f. **Seminários de estudos:** tem por finalidade transmitir e discutir informações e extrair conclusões. Trabalho utilizado em reuniões, congressos, encontros programados por órgãos e instituições diversas. Os seminários dependem daquele que introduz o assunto e conduz a discussão, seu êxito fica

condicionado a um indivíduo e ao interesse e capacidade de outros para intervir oportunamente no debate.

Assim, quanto ao seu tipo, esta pesquisa pode ser classificada como descritiva, pois será observado e analisado o comportamento das falhas dos equipamentos com o objetivo de avaliar a coerência da atual estratégia de manutenção empregada pela empresa.

São duas, as abordagens das pesquisas científicas:

- a. **Quantitativa.**
- b. **Qualitativa.**

Para Cauchick Miguel (2012), a abordagem quantitativa está preocupada em eliminar qualquer subjetividade na avaliação das variáveis da pesquisa, sendo o uso da linguagem matemática a forma mais adequada para isto. Dessa forma, nenhum subjetivismo estará influenciando a apreensão dos fatos na geração de conhecimento.

Ainda de acordo com Cauchick Miguel (2012), as hipóteses são testadas de acordo com os conceitos contidos em variáveis mensuráveis, então, os dados serão coletados e posteriormente analisados, geralmente com o uso da estatística. A interpretação dos resultados fornecerá uma base para a indução dos resultados, que, quando somada a base teórica existente, a estenderá ou a modificará.

No campo da Engenharia de Produção, os métodos mais adequados para uma pesquisa quantitativa são, segundo Cauchick Miguel (2012):

- a. **Pesquisa de avaliação (survey):** o pesquisador não manipula os níveis das variáveis de pesquisa, elas são avaliadas pelo respondente do questionário, que é o instrumento de pesquisa.
- b. **Modelagem/Simulação:** o pesquisador manipula as variáveis da pesquisa, porém não na realidade, isso é feito através de um modelo, que é uma abstração da realidade.
- c. **Experimento/Quase-experimento:** o pesquisador delinea um experimento de forma a testar o relacionamento entre as variáveis da pesquisa, estabelecendo níveis para elas e, observa o resultado na variável dependente. No experimento as variáveis que não fazem parte do experimento são isoladas, isto é, o pesquisador tem controle sobre as variáveis. No entanto, no quase-experimento, as variáveis que não fazem parte da pesquisa não podem ser isoladas e controladas e, seu comportamento é tão importante quando o comportamento das variáveis manipuláveis. Exemplos de variáveis que devem

ser acompanhadas num quase-experimento são encontrados nas pesquisas de engenharia de produção, estratégia, motivação, etc.

Na abordagem qualitativa, ao contrário do que se afirma, não há ausência de quantificação das variáveis da pesquisa, porém, é a ênfase na perspectiva no indivíduo que está sendo estudada que à diferencia da abordagem quantitativa.

De acordo com Cauchick Miguel (2012), a preocupação é obter informações sobre a perspectiva dos indivíduos, bem com interpretar o ambiente em que o problema está inserido, sendo o ambiente natural dos indivíduos o ambiente da pesquisa.

A realidade subjetiva dos indivíduos envolvidos na pesquisa é relevante na abordagem qualitativa e, contribui para o desenvolvimento da pesquisa e para a construção de uma realidade objetiva, sendo um dos marcos da ciência (CAUCHICK MIGUEL, 2012).

Desse modo, a abordagem qualitativa utiliza uma série de técnicas de interpretação que tem como objetivo descrever, decodificar e traduzir o entendimento e não a frequência de ocorrência das variáveis de determinado fenômeno (CAUCHICK MIGUEL, 2012).

Do ponto de vista da abordagem, esta pesquisa é quantitativa e como método, utilizará a modelagem estatística com o objetivo calcular a confiabilidade de equipamentos.

5.2 Procedimentos Operacionais

A seguir é apresentado o passo a passo para o desenvolvimento desta dissertação.

Passo 1: Estudo teórico sobre Manutenção (evolução, políticas e tipos) e Análise de Confiabilidade (funções e modelos quantitativos paramétricos).

Passo 2: Realização da coleta, no banco de dados da empresa estudada, dos dados de tempo de reparo (TTR) e tempo entre falhas (TBF) dos equipamentos industriais exclusivamente utilizados no processo produtivo das linhas de produção.

As informações existentes no banco de dados não são detalhadas e não apresentam uma padronização (texto livre).

Os dados foram extraídos do banco de dados a partir da geração de relatórios do sistema de gestão de manutenção, são referentes ao período compreendido entre janeiro de 2014 e maio de 2016 e apresenta 11.838 observações de paradas dos equipamentos produtivos da planta fabril. Estão disponíveis as seguintes variáveis:

- Descrição do equipamento: nome do equipamento;
- Linha: linha de produção em que o equipamento está localizado (linha 1...linha 20);

- Ocorrência: breve descrição do problema ocorrido (texto livre sem padronização);
- Observação: utilizado para uma descrição mais detalhada do ocorrido e/ou para descrever o que foi executado para solução do ocorrido (texto livre sem padronização);
- Executante: código e nome do manutentor responsável pelo serviço de manutenção executado;
- Data início: data de início do serviço de manutenção;
- Hora de início: hora de início do serviço de manutenção;
- Data final: data fim do serviço de manutenção;
- Hora final: hora fim do serviço de manutenção;
- Tempo total: tempo em minutos gasto no serviço de manutenção;
- Oficina: descrição da área de origem do serviço de manutenção (mecânica geral; mecânica de embalagem; eletroeletrônica; elétrica predial);

As variáveis a seguir estão disponíveis apenas para os manutentores ativos no momento da extração das informações do banco de dados, ou seja, manutentores que executaram serviços de manutenção em algum momento no passado e não estão mais ativos, não terão informação para estas variáveis:

- Idade: idade do manutentor;
- Anos experiência: tempo em anos de experiência do manutentor;
- Escolaridade: descrição do nível de escolaridade do manutentor (fundamental completo; médio incompleto; médio completo; técnico incompleto; técnico completo; superior incompleto; superior completo; pós-graduação);
- Função: cargo do manutentor (auxiliar; operador de utilidades; técnico de manutenção I, técnico de manutenção II; técnico de manutenção III; técnico em automação; eletricista de manutenção predial; coordenador de manutenção);
- Turno: turno em que o manutentor está alocado (1º turno; 2º turno; 3º turno).

Passo 3: Realização da análise estatística preliminar dos dados coletados com o objetivo de selecionar a amostra (equipamentos) utilizada para a modelagem de confiabilidade. Os equipamentos selecionados foram um conjunto de 6 máquinas de embalagens localizadas na linha 07 de produção. O conjunto de equipamentos foi selecionado por apresentarem maior frequência de falhas da linha 07 de produção, que é alinha mais

crítica da planta fabril por ser a responsável pela produção do produto de maior volume da empresa.

Passo 4: Realização do teste de aderência, com o uso de técnicas gráficas, para se encontrar as distribuições de probabilidade que melhor descrevem os dados de amostra dos equipamentos. Foram testadas as distribuições Log-normal, Exponencial, Weibull e Gama para os dados amostrais de tempo de reparo (TTR) e tempo entre falhas (TBF). A análise gráfica mostrou que a distribuição Log-normal é a que melhor descreve os dados de tempo de reparo (TTR) e a distribuição de Weibull a que melhor descreve os dados de tempo entre falhas (TBF).

Passo 5: Com o uso do modelo Log-normal, foi modelada a função de manutenibilidade para os dados de tempo de reparo (TTR) e calculado o tempo médio de reparo (MTTR) para os equipamentos da amostra. Foram, ainda, calculadas as estatísticas descritivas para o tempo de reparo (média, mínimo, máximo, desvio-padrão e coeficiente de variação).

Passo 6: Com o uso o modelo Weibull, foi modelada a função de confiabilidade e taxa de falha para os dados de tempo entre falhas (TBF) e calculado tempo médio entre falhas (MTBF) dos equipamentos. Foram, ainda, calculadas as estatísticas descritivas para o tempo entre falhas (média, mínimo, máximo, desvio-padrão e coeficiente de variação).

Passo 7: Foi calculada, a partir do tempo médio de reparo (MTTR) e tempo médio entre falhas (MTBF), a disponibilidade dos equipamentos.

Passo 8: Com o uso do modelo Weibull, foi calculada a confiabilidade dos equipamentos funcionarem por pelo menos 100 horas antes de apresentarem falha.

Passo 9: Foi calculado o provável tempo, em horas, em que 50% dos equipamentos apresentarão falha.

Passo 10: Análise do resultado da modelagem para cada equipamento.

Passo 11: Com o uso do parâmetro de forma (γ) do modelo Weibull, foi definido o provável posicionamento dos equipamentos no gráfico de ciclo de vida da curva da banheira.

Passo 12: Como as estatísticas descritivas do tempo de reparo (TTR) e tempo entre falha (TBF) apresentaram coeficiente de variação elevados, evidenciando alta dispersão dos dados, foram construídos os gráficos de Boxplot e Histograma, com o objetivo de demonstrar visualmente o comportamento de distribuição dos dados de TTR e TBF.

Passo 13: Comparação da modelagem entre as Máquinas de Embalagem 1 e 6.

Passo 14: Comparação dos resultados da modelagem da análise de confiabilidade com a atual estratégia de manutenção empregada pela empresa estuda.

6 MODELAGEM ESTATÍSTICA DA CONFIABILIDADE

Quando gerentes se deparam com uma situação de tomada de decisão, onde se necessita escolher uma alternativa dentre uma série de alternativas conflitantes, duas opções básicas se apresentam: (1) usar apenas a intuição gerencial para fazer tal escolha; e (2) utilizar um processo de modelagem da situação de maneira a estudar mais profundamente o problema (LACHTERMACHER, 2009).

Para Batalha (2008), um modelo é um veículo para se chegar a uma visão bem estruturada da realidade, sendo uma representação simplificada de um sistema ou objeto real.

Para Lachtermacher (2009) e Pizzolato e Gandolpho (2013), existe basicamente três tipos de modelos: (1) modelos físicos ou icônicos; (2) modelos análogos ou analógicos; e (3) modelos matemáticos ou simbólicos.

- 1. Modelos físicos ou icônicos:** são exemplos de modelo físico casas e aeronaves utilizados por engenheiros;
- 2. Modelos análogos ou analógicos:** representa relações utilizando diferentes meios, são exemplos, os mapas rodoviários que representam as rodovias de uma região por traços sobre um papel e o marcador de combustível, que representa, em uma escala circular, a quantidade existente de gasolina no tanque;
- 3. Modelos matemáticos ou simbólicos:** são mais utilizados na modelagem de decisões gerenciais em que grandezas são representadas por variáveis de decisão e, as relações entre essas variáveis, por expressões matemáticas.

Modelos matemáticos podem ser classificados quanto ao nível de incerteza existente entre as relações das variáveis como, determinísticos ou probabilísticos (LACHTERMACHER, 2009).

Modelos determinísticos são aqueles em que todas as informações relevantes são assumidas como conhecidas, ou seja, não há a existência de incertezas.

Já os modelos probabilísticos assumem a existência de incerteza nas variáveis de decisão, ou seja, nem todas as variáveis são conhecidas com certeza e, esta incerteza, deve ser incorporada ao modelo.

De acordo com Batalha (2008), um modelo deve ser suficientemente detalhado para captar os elementos essenciais e representar o sistema real e deve ser suficientemente simples para ser tratável por métodos de análise e resolução conhecidos.

Para Cauchick Miguel (2012), em geral, a construção de um modelo envolve dois processos de abstração. Inicialmente o sistema real é abstraído em um modelo conceitual, na

qual, apenas uma fração das variáveis originais que determinam o comportamento do sistema é considerada. Em seguida, o modelo conceitual é abstraído em um modelo matemático analítico, em que as relações do sistema podem ser expressas por funções matemáticas, para representar satisfatoriamente o sistema. Assim, simplificações razoáveis do modelo conceitual devem ser realizadas em diferentes níveis para se formular um modelo matemático.

Ainda para Cauchick Miguel (2012), a utilização de modelos permite uma melhor compreensão sobre o ambiente estudado, a identificação de problemas e a formulação de estratégias, além de apoiar e sistematizar o processo de tomada de decisões.

Lachtermacher (2009) ressalta que o uso da modelagem em conjunto com a intuição gerencial melhora o processo de tomada de decisão, pois a intuição do tomador de decisão deve auxiliá-lo na escolha das variáveis relevantes, nos possíveis cenários de estudo, na validação do modelo e na análise dos resultados.

O objetivo da modelagem deste trabalho é apresentar a aplicação prática dos desenvolvimentos teóricos apresentados nas seções anteriores.

O software Minitab® 16 é utilizado como facilitador nas etapas de processamento de dados e geração dos resultados, de modo a demonstrar sua utilização prática em ambientes produtivos e sobre dados reais de vida de equipamentos.

A modelagem apresenta o uso da análise de confiabilidade de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia, na qual a aplicação do modelo permitiu a análise e o direcionamento de esforços de melhoria de problemas práticos envolvendo o tempo de vida de equipamentos no contexto da Engenharia de Manutenção.

6.1 Caracterização da Empresa

A empresa estudada atua na Indústria Alimentícia no segmento de Biscoitos, Torradas e Snacks. Fundada em 1956, atualmente se consolida como a segunda maior fabricante de biscoitos no Brasil, a primeira marca mais consumida e o maior fabricante no segmento de Maria/Maisena dentro do segmento de biscoitos.

Seu parque fabril está localizado no interior do Estado de São Paulo, onde são produzidos os produtos para distribuição no Brasil e em mais de 50 países em todo o mundo.

Atualmente possui 21 linhas de produção em 50 mil m² de área construída. Possui capacidade produtiva em torno de 200 mil toneladas por ano, com processos modernos e equipamentos automatizados.

Sua linha de produtos compõe-se de mais de 100 itens, entre biscoitos Salgados, Doces, Amanteigados, Rosquinhas, Recheados, Infantis, Wafers, Moldados Especiais e Cookies.

Possui cerca de 3.200 funcionários, 1.662 ligados diretamente ao processo produtivo, sendo aproximadamente 170 atuando na área de Engenharia de Manutenção.

A fábrica funciona 24 horas por dia, 7 dias por semana.

6.2 Definição da Amostra

Passo 2 – Coleta dos Dados (Procedimentos Operacionais).

Foram retirados do sistema de gestão da empresa estudada 11.838 observações referentes aos dados de tempo de reparo (TTR) e tempo entre falhas (TBF) dos equipamentos utilizados exclusivamente no processo produtivo referentes ao período entre janeiro 2014 e maio de 2016.

Passo 3 – Análise Estatística Preliminar (Procedimentos Operacionais)

Uma análise preliminar dos dados retirados do sistema de gestão da empresa evidencia as linhas de produção com as maiores frequências de falhas.

Pode-se observar, através da Figura 5, que a Linha 07 de produção é a linha que apresenta a maior frequência de falhas.

A Linha 07 de produção funciona 24 horas por dia, 7 dias por semana, parando apenas nos períodos de intervalos para refeições e de manutenção preventiva programada. Ela é uma linha dedicada, produzindo apenas biscoitos do tipo Maisena, um dos produtos de maior volume de vendas na empresa. Tem capacidade de produzir aproximadamente 3.600 kg/h de biscoitos e, atualmente opera com 95% de sua capacidade.

De acordo com o Gerente de Manutenção, por ser uma linha de produção muito crítica, esta deve apresentar a maior disponibilidade (A_v) possível, ou seja, deve apresentar maior tempo médio entre falhas (MTBF), menor tempo de reparo (MTTR) e as intervenções não programadas devem ser minimizadas.

Observando os equipamentos que constituem a Linha 07 de produção, pode-se observar, através da Figura 6, que as Máquinas de Embalagem 1, 3, 4, 5, 2 e 6 concentram aproximadamente 82% das falhas ocorridas na Linha 07.

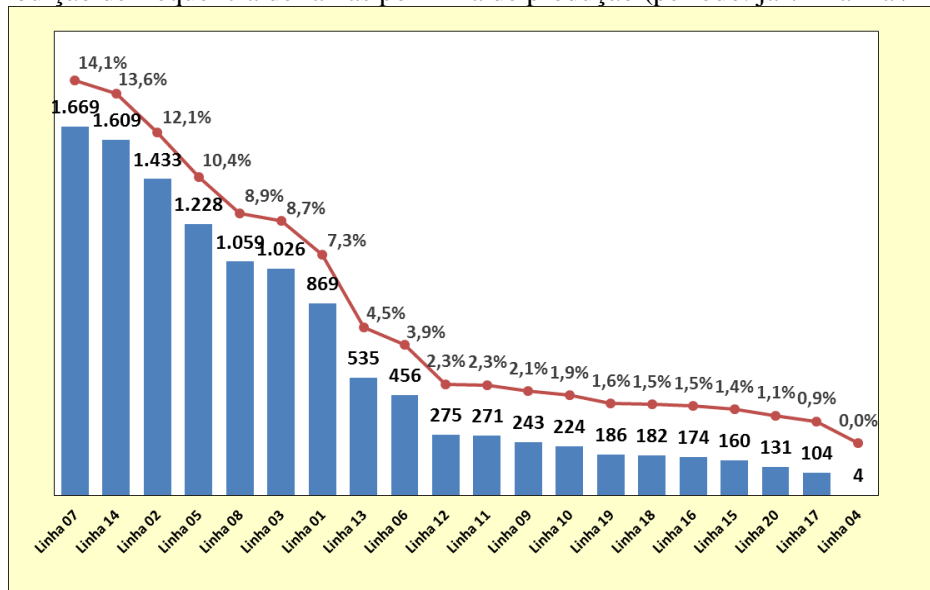
As Máquinas de Embalagem 1, 5, 2 e 6 são da marca Gotesp modelo Speed, com capacidade para embalar 80 pacotes por minuto, as Máquinas de Embalagem 3 e 4 (mais antigas) são do modelo V3, com capacidade para embalar 40 pacotes por minuto, todas utilizadas para os pacotes internos. A Linha 07 de produção possui ainda duas máquinas de

embalagens para os pacotes externos, ambas da marca Bosch modelo Sig 203, com capacidade para embalar 72 pacotes por minuto (Máquina de Embalagem SIG2 e SIG1), as quais não faram parte deste trabalho.

Ainda de acordo com o Gerente de Manutenção, as máquinas de embalagem não são equipamentos gargalos na linha de produção, pois funcionam de forma independentes uma das outras e, na ocorrência de parada em alguma, pode-se, por um período curto de até duas horas, alocar um operador para fazer a retirada manual de produtos da máquina para ser embalado em momento posterior. As máquinas trabalham em conjunto, porém existem atividades para recuperar algumas perdas onde se usa uma ou duas máquinas separadamente das outras, escolhidas de forma aleatória.

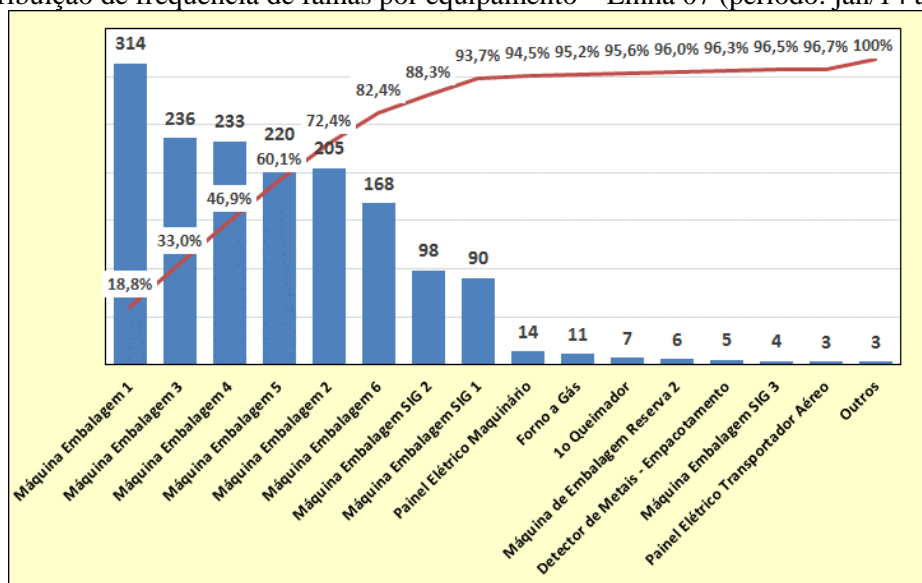
Desse modo, os equipamentos escolhidos para amostra são um conjunto de 6 Máquinas de Embalagem, composto pelas Máquinas 1, 3, 4, 5, 2 e 6, localizadas na Linha 07 de produção, as quais concentram a maior frequência de falhas desta linha. A amostra possui 1.376 observações referentes aos dados de tempo de reparo e tempo entre falhas.

Figura 5 – Distribuição de frequência de falhas por linha de produção (período: jan/14 a mai/16)



Fonte: Próprio autor

Figura 6 – Distribuição de frequência de falhas por equipamento – Linha 07 (período: jan/14 a mai/16)



Fonte: Próprio autor

6.3 Construção do Modelo de Análise de Confiabilidade

Esta seção apresenta a construção do modelo de análise de confiabilidade dos dados para o conjunto de máquinas de embalagem.

O modelo quantitativo aqui desenvolvido é caracterizado como probabilístico, pois os valores das variáveis de decisão não são conhecidos com certeza e, assim como exposto na seção 3.1.4, é um modelo paramétrico, onde se busca a especificação de uma distribuição de probabilidade adequada aos dados.

A modelagem dos dados foi realizada com o auxílio do software Minitab® versão 16, que é um software para análise estatística dotado de ferramentas para a modelagem de dados de confiabilidade.

A partir do sistema de informações da empresa, foram levantados os dados de tempo de reparo (TTR – *Time-To-Repair*) e tempo entre falhas (TBF – *Time-Between-Failure*) entre os meses de janeiro de 2014 e maio de 2016 para as 6 máquinas de embalagem da Linha 07 de produção. Os tempos são dados em horas.

É importante salientar que, apesar dos dados do presente estudo não apresentarem censura, a modelagem dos dados de confiabilidade na presença de censura foi apresentada na Seção 3.1.3 com o objetivo de demonstrar o uso mais amplo de modelos estatísticos de confiabilidade.

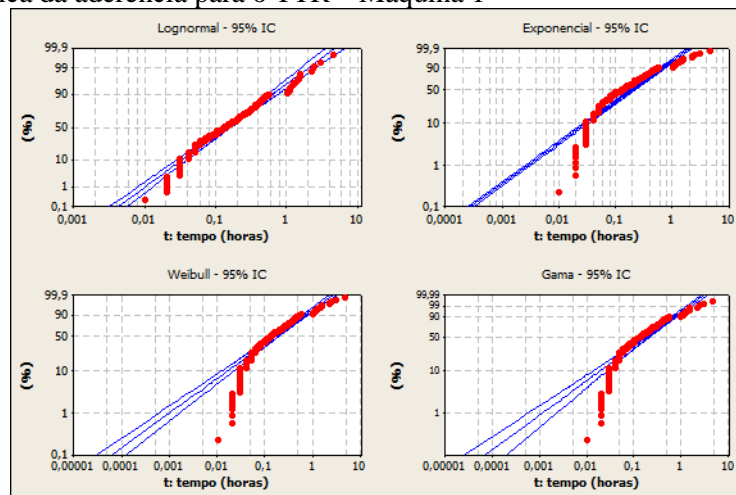
Passo 4 – Teste de Aderência (Procedimentos Operacionais)

A análise estatística iniciou-se com o uso de técnicas gráficas para verificação de ajuste dos dados para as distribuições Log-normal, Exponencial, Weibull e Gamma para cada máquina.

As Figuras 7 a 12 apresentam os resultados dos testes para o tempo de reparo (TTR) das 6 máquinas de embalagem.

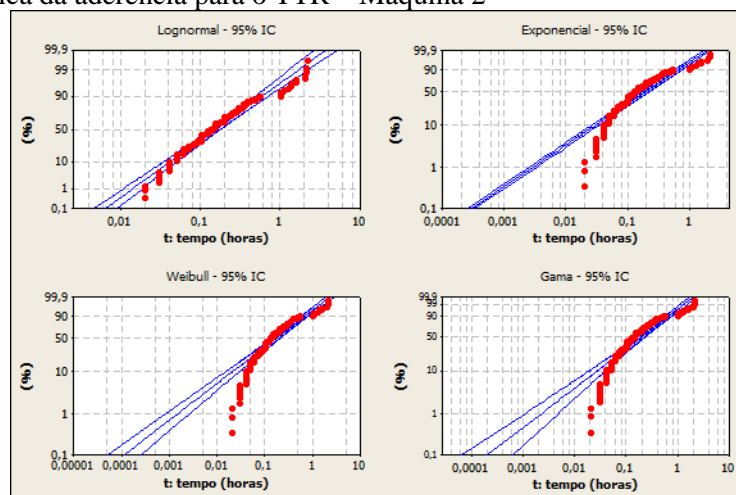
A partir da análise gráfica da aderência para os TTR's, foram selecionadas as distribuições com melhor ajuste. No Quadro 2 são apresentadas as distribuições selecionadas para cada máquina de embalagem.

Figura 7 – Análise gráfica da aderência para o TTR – Máquina 1



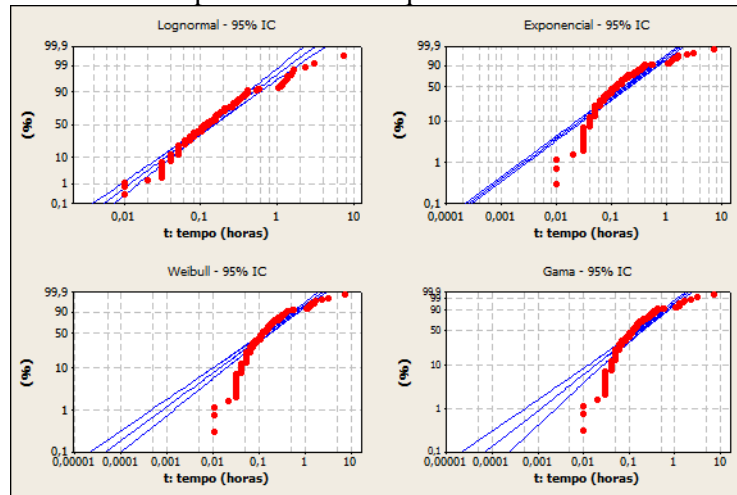
Fonte: Próprio autor

Figura 8 – Análise gráfica da aderência para o TTR – Máquina 2



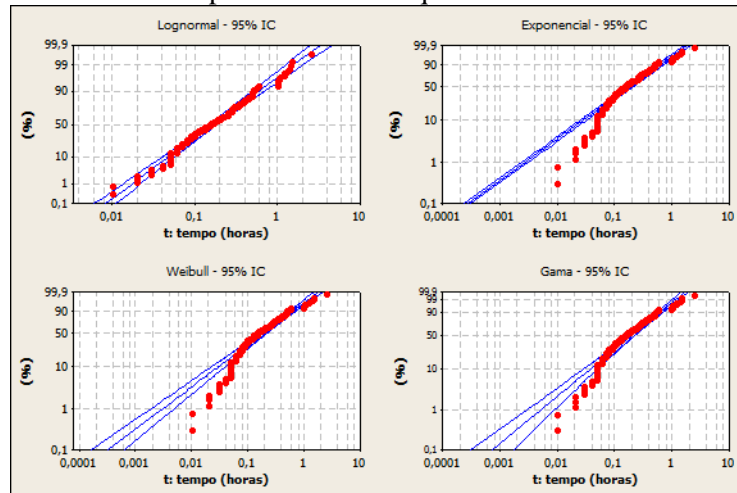
Fonte: Próprio autor

Figura 9 – Análise gráfica da aderência para o TTR – Máquina 3



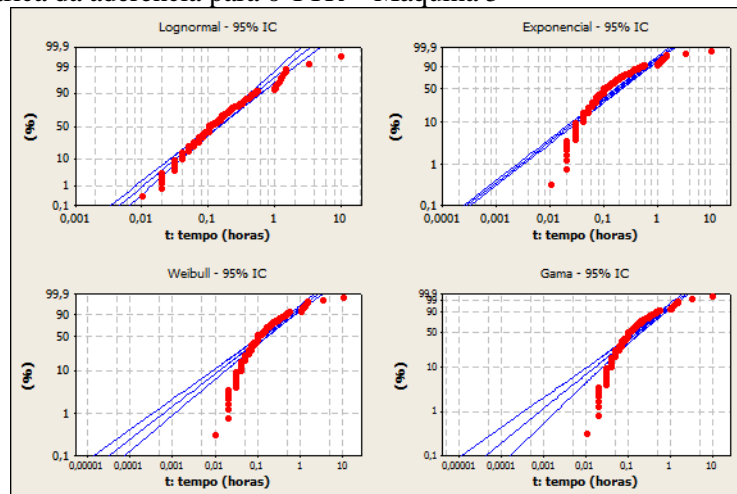
Fonte: Próprio autor

Figura 10 – Análise gráfica da aderência para o TTR – Máquina 4



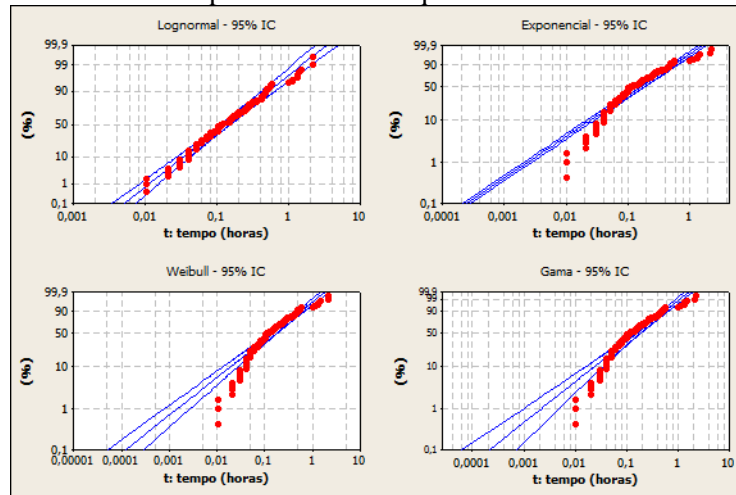
Fonte: Próprio autor

Figura 11 – Análise gráfica da aderência para o TTR – Máquina 5



Fonte: Próprio autor

Figura 12 – Análise gráfica da aderência para o TTR – Máquina 6



Fonte: Próprio autor

Quadro 2 – Seleção da distribuição com melhor ajuste – TTR

Máquina	Distribuição			
	Log-normal	Exponencial	Weibull	Gama
Máquina 1	Não rejeitada	Rejeitada	Rejeitada	Rejeitada
Máquina 2	Não rejeitada	Rejeitada	Rejeitada	Rejeitada
Máquina 3	Não rejeitada	Rejeitada	Rejeitada	Rejeitada
Máquina 4	Não rejeitada	Rejeitada	Rejeitada	Rejeitada
Máquina 5	Não rejeitada	Rejeitada	Rejeitada	Rejeitada
Máquina 6	Não rejeitada	Rejeitada	Rejeitada	Rejeitada

Fonte: Próprio autor

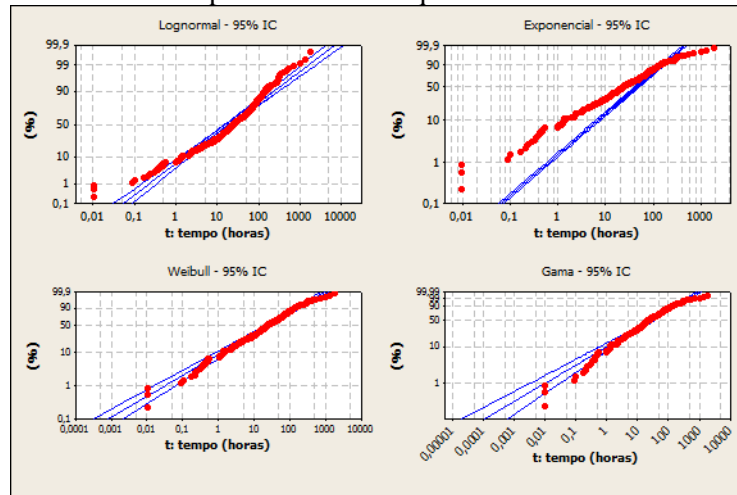
Pela análise gráfica oferecida pelo Minitab®, a distribuição de probabilidade do modelo Log-normal parece descrever razoavelmente a amostra de dados de TTR para o conjunto das 6 máquinas de embalagem.

Em seguida prosseguiu-se com o uso de técnicas gráficas para verificação de ajuste dos dados para as distribuições consideradas para o tempo entre falhas (TBF).

As Figuras 13 a 18 apresentam os resultados dos testes para o tempo entre falhas das 6 máquinas de embalagem.

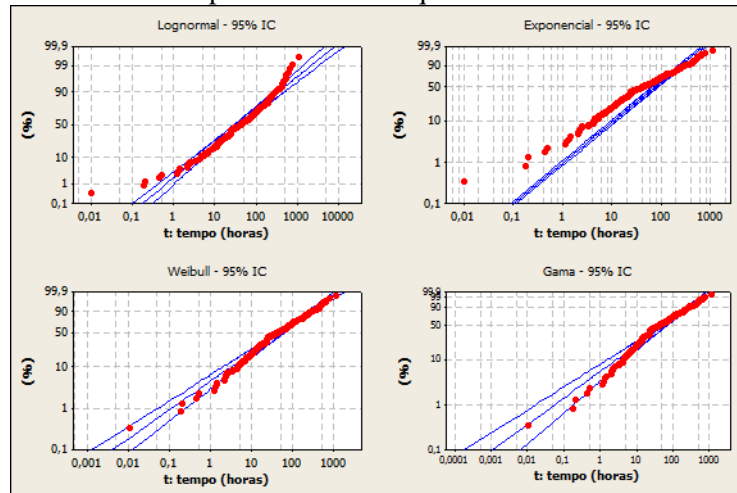
A partir da análise gráfica da aderência para os TBFs, foram selecionadas as distribuições com melhor ajuste. No Quadro 3 são apresentadas as distribuições selecionadas para cada máquina de embalagem.

Figura 13 – Análise gráfica da aderência para o TBF – Máquina 1



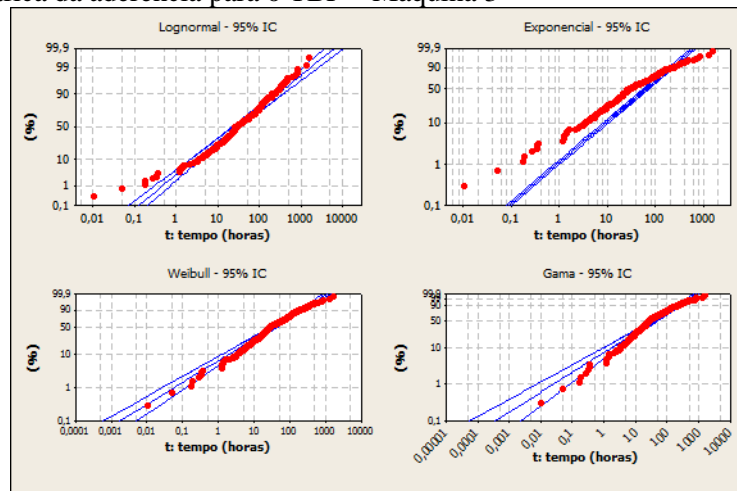
Fonte: Próprio autor

Figura 14 – Análise gráfica da aderência para o TBF – Máquina 2



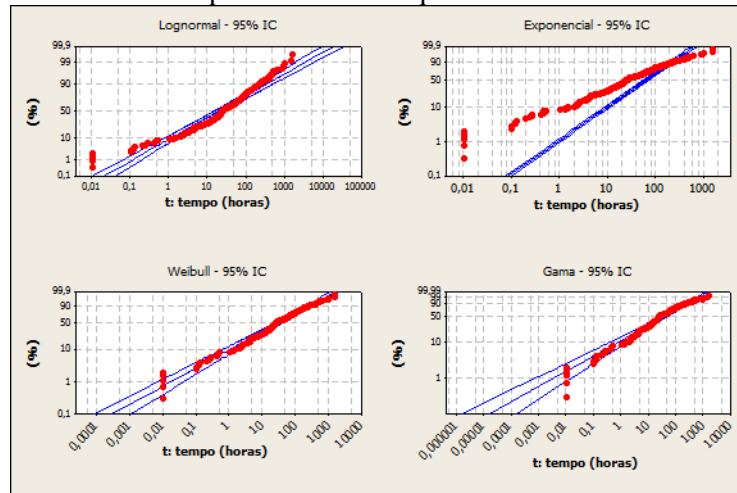
Fonte: Próprio autor

Figura 15 – Análise gráfica da aderência para o TBF – Máquina 3



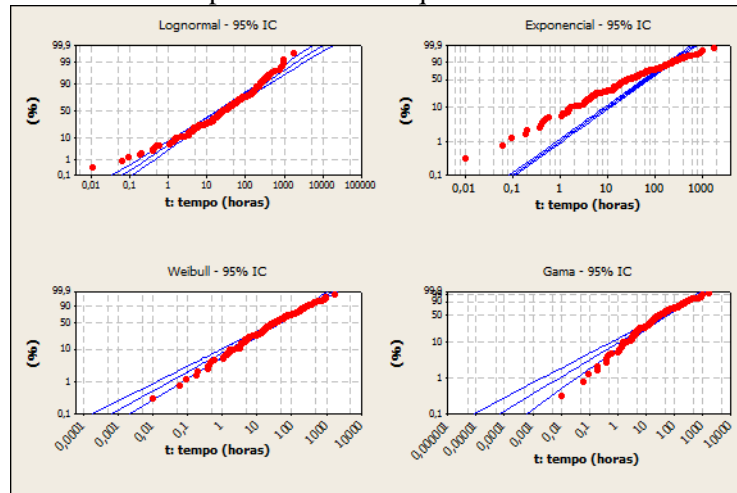
Fonte: Próprio autor

Figura 16 – Análise gráfica da aderência para o TBF – Máquina 4



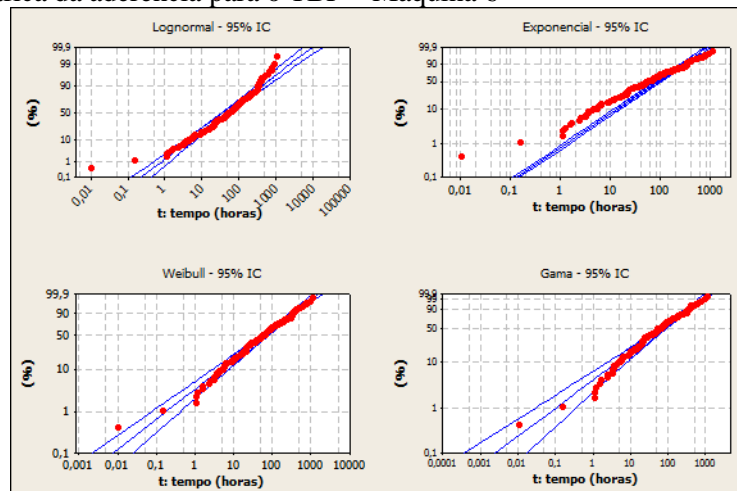
Fonte: Próprio autor

Figura 17 – Análise gráfica da aderência para o TBF – Máquina 5



Fonte: Próprio autor

Figura 18 – Análise gráfica da aderência para o TBF – Máquina 6



Fonte: Próprio autor

Quadro 3 – Seleção da distribuição com melhor ajuste – TBF

Máquina	Distribuição			
	Log-normal	Exponencial	Weibull	Gama
Máquina 1	Rejeitada	Rejeitada	Não Rejeitada	Rejeitada
Máquina 2	Rejeitada	Rejeitada	Não Rejeitada	Rejeitada
Máquina 3	Rejeitada	Rejeitada	Não Rejeitada	Rejeitada
Máquina 4	Rejeitada	Rejeitada	Não Rejeitada	Rejeitada
Máquina 5	Rejeitada	Rejeitada	Não Rejeitada	Rejeitada
Máquina 6	Rejeitada	Rejeitada	Não Rejeitada	Rejeitada

Fonte: Próprio autor

Pela análise gráfica oferecida pelo software Minitab® versão 16, a distribuição de probabilidade do modelo Weibull parece descrever razoavelmente a amostra de dados de TBF para o conjunto de máquinas.

Após a escolha das distribuições que melhor descrevem os dados de tempos para o conjunto de máquinas, seguiu-se para a modelagem das funções de manutenibilidade, confiabilidade e taxa de falha para as máquinas, do tempo médio de reparo (MTTR) e tempo médio entre falhas (MTBF).

Passo 5 – Função de Manutenibilidade (Procedimentos Operacionais)

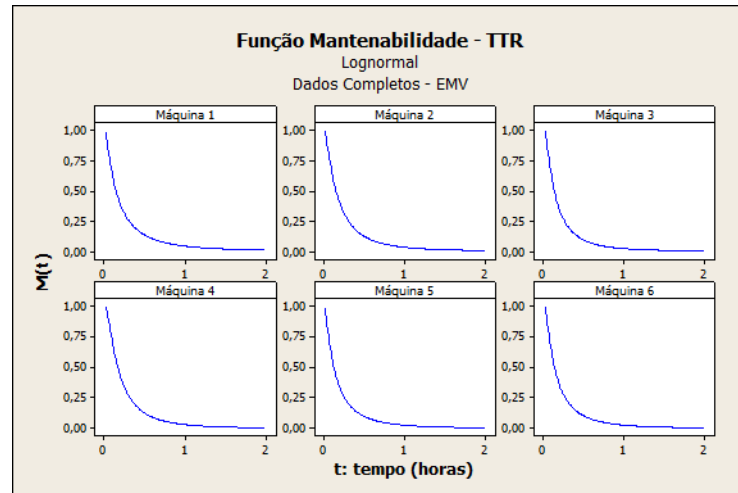
A função manutenibilidade $M(t)$, (probabilidade de duração da atividade de manutenção), está relacionada com o esforço necessário para a realização da atividade de manutenção, assim, o tempo médio de reparo (MTTR) compreende o tempo gasto para o reparo e para os testes necessários para se colocar o equipamento novamente em operação normal (CERVEIRA; SELBITTO, 2015; MENGUE; SELBITTO, 2013).

Cerveira e Sellitto (2015) afirmam que este tempo não é constante, ou seja, ele varia ao longo do tempo devido a fatores como a capacidade de se diagnosticar a falha, disponibilidade de equipamentos e habilidade do manutentor para realizar o reparo.

A partir da equação dada em (3.26), foi calculada a função manutenibilidade $M(t)$ do conjunto de máquinas e apresentada na Figura 19. A modelagem do tempo médio de reparo (MTTR) pelo modelo Log-normal (estimadores de máxima verossimilhança - EMV), calculado a partir da equação dada em (3.27), e as estatísticas descritivas dos dados são apresentados na Tabela 2.

Dos dados da amostra foram extraídos os valores máximos (Max) e mínimos (Min), média, desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV), que é a razão entre o desvio padrão e a média e mede a variabilidade dos dados.

Figura 19 – Função Manutenibilidade – TTR



Fonte: Próprio autor

Tabela 2 – Estatísticas descritivas e EMV dos parâmetros do modelo de TTR – Modelo Log-normal

Máquina	N	Min	Max	MTTR	DP	CV	IC 95%	Média na	DP na
								escala log	escala log
								μ	σ
Máquina 1	314	0,02	4,95	0,27	0,44	1,63	0,23 até 0,32	-1,96	1,14
Máquina 2	205	0,03	2,30	0,26	0,35	1,37	0,22 até 0,31	-1,88	1,03
Máquina 3	236	0,02	7,20	0,21	0,29	1,37	0,18 até 0,25	-2,07	1,03
Máquina 4	233	0,02	2,90	0,26	0,33	1,25	0,23 até 0,31	-1,81	0,97
Máquina 5	220	0,02	10,18	0,22	0,33	1,46	0,19 até 0,27	-2,07	1,07
Máquina 6	168	0,02	2,32	0,23	0,32	1,43	0,19 até 0,28	-2,04	1,06

Fonte: Próprio autor

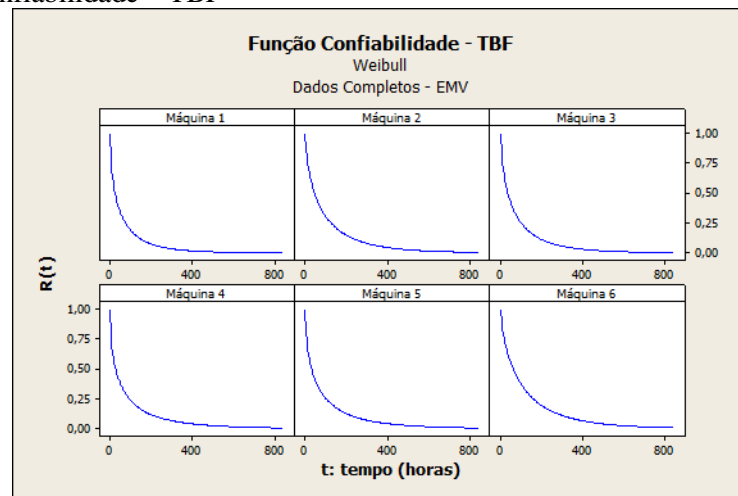
Passo 6 – Função de Confiabilidade e Taxa de Risco (Procedimentos Operacionais)

A modelagem da função confiabilidade oferece informações importantes, como a probabilidade de sobrevivência até um tempo t , o tempo médio entre falhas e a função risco do equipamento (MENGUE; SELITTO, 2013).

Para Lewis (1994), por não ser possível conhecer e controlar todos os fatores que afetam o tempo entre falhas, é necessária a modelagem de distribuições de probabilidade.

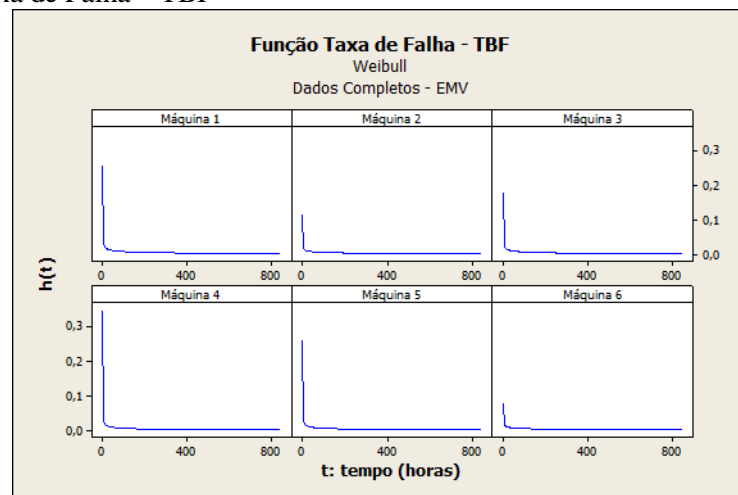
As funções confiabilidade $R(t)$ e taxa de falha $h(t)$ das máquinas de embalagem, calculadas a partir das equações dadas em (3.18) e (3.19), podem ser encontradas nas Figuras 20 e 21, respectivamente. A modelagem do tempo médio entre falhas (MTBF) pelo modelo Weibull, dado pela equação (3.20), e a estatística descritiva dos dados são apresentados na Tabela 3.

Figura 20 – Função Confiabilidade – TBF



Fonte: Próprio autor

Figura 21 – Função Taxa de Falha – TBF



Fonte: Próprio autor

Tabela 3 – Estatísticas descritivas e EMV dos parâmetros do modelo de TBF – Modelo Weibull

Máquina	N	Min	Max	MTBF	DP	CV	IC 95%	Parâmetro de forma γ	Parâmetro de escala θ
Máquina 1	313	0,02	1.794,85	63,34	104,37	1,65	52,94 até 75,78	0,63	44,94
Máquina 2	204	0,02	1.088,92	101,74	150,19	1,48	83,24 até 124,36	0,69	79,75
Máquina 3	233	0,02	1.560,27	82,37	129,69	1,57	67,52 até 100,48	0,66	61,00
Máquina 4	231	0,02	1.583,47	86,89	163,47	1,88	68,61 até 110,04	0,57	53,65
Máquina 5	219	0,02	1.683,87	91,48	160,47	1,75	72,90 até 114,81	0,60	60,95
Máquina 6	166	0,02	1.066,02	125,44	176,85	1,41	101,35 até 155,26	0,72	102,09

Fonte: Próprio autor

Passo 7 – Disponibilidade (Procedimentos Operacionais)

A disponibilidade $Av(t)$, é a probabilidade de que um equipamento esteja disponível para operação no momento em que este for necessário (MENGUE; SELLITTO, 2013).

Para Dias (2010), a disponibilidade de um equipamento ou sistema está diretamente ligada à sua qualidade temporal, ou seja, a vida útil desse sistema.

Esta dependência é representada pela equação 6.1.

$$Av(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (6.1)$$

A partir de (6.1), foi calculada a disponibilidade das máquinas de embalagem, apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Disponibilidade das Máquinas

Máquina	MTTR	MTBF	Disponibilidade <i>Av(t)</i>
Máquina 1	0,27	63,34	99,57%
Máquina 2	0,26	101,74	99,75%
Máquina 3	0,21	82,37	99,74%
Máquina 4	0,26	86,89	99,70%
Máquina 5	0,22	91,48	99,76%
Máquina 6	0,23	125,44	99,82%

Fonte: Próprio autor

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA MODELAGEM

Nesta seção será apresentada a análise do resultado da modelagem dos dados para o tempo de reparo, tempo entre falhas, disponibilidade e confiabilidade para cada máquina de embalagem apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4, sob a luz dos trabalhos de Sellitto (2005, 2007) e Mengue e Sellitto (2013).

Passo 8 – Confiabilidade Para 100 Horas (Procedimentos Operacionais)

Utilizando a equação da função de confiabilidade $R(t)$ do modelo Weibull, dada em (3.18), foi calculada a confiabilidade dos equipamentos funcionarem por pelo menos 100 horas.

Passo 9 – Tempo em que Ocorrem 50% das Falhas (Procedimentos Operacionais)

Com o uso da equação de percentil de falhas do modelo de Weibull, dada em (3.23), foi calculado o provável tempo, em horas, em que 50% das falhas ocorrerão.

Para auxiliar a análise, os resultados dos parâmetros dos modelos Log-normal (μ , σ) e Weibull (γ , θ) e as equações para o cálculo do MTTR, MTBF, confiabilidade, disponibilidade e percentil são resumidas e apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Equações e cálculos da análise de confiabilidade e disponibilidade

	Parâmetro/Equação	Máquinas de Embalagem					
		1	2	3	4	5	6
Média (escala log)	μ	-1,96	-1,88	-2,07	-1,81	-2,07	-2,04
Desvio Padrão (escala log)	σ	1,14	1,03	1,03	0,97	1,07	1,06
Forma (Weibull)	γ	0,63	0,69	0,66	0,57	0,60	0,72
Escala (Weibull)	θ	44,94	79,75	61,00	53,65	60,95	102,09
MTTR (horas)	$MTTR = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)$	0,27	0,26	0,21	0,26	0,22	0,23
MTBF (horas)	$MTBF = \theta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$ <i>Γ é a função gama</i>	63	102	82	87	91	125
Disponibilidade	$Av = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$	99,57%	99,75%	99,74%	99,70%	99,76%	99,82%
Confiabilidade $t = 100h$	$R(t) = e^{\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma\right]}$	19,04%	31,03%	25,07%	24,05%	26,01%	37,34%
50% das falhas ($p_{50\%}$)	$P(T \leq t_p) = t_p = \theta[-\ln(1-p)]^{\frac{1}{\gamma}}$	25	47	35	28	33	61

Fonte: Próprio autor

Passo 10 – Análise de Cada Equipamento (Procedimentos Operacionais)

Neste trabalho, assim como em Sellitto (2005), Mengue e Sellitto (2013), Mobley (2008) entre outros, a estratégia de manutenção corretiva é assumida como corretiva planejada, diferenciando-se da corretiva de emergência.

O que se propõe com a estratégia de manutenção corretiva é a busca e correção das falhas de origem, ou seja, a estratégia não se limita a corrigir a falha o mais rápido possível, mas sim, a encontrar e eliminar a causa raiz das falhas.

A Máquina de Embalagem 1 apresenta tempo médio de reparo de 16,2 minutos (MTTR = 0,27 horas), sendo o maior entre o conjunto de equipamentos. Com tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 63 horas, o menor entre o conjunto e, com parâmetro de forma (γ) igual a 0,63, pode-se inferir que a taxa de falhas é decrescente, cujos problemas podem decorrer de má especificação ou mau projeto, má instalação, má operação ou má fabricação de componentes de reposição. Neste caso pode-se considerar que o equipamento se encontra na fase de mortalidade infantil da curva da banheira, já que $\gamma < 1$ (parâmetro de forma do modelo Weibull) e, de acordo com Sellitto (2005), a estratégia de manutenção sugerida é a corretiva com o objetivo de reforçar os itens que quebraram e remover as causas das falhas de origem. O maior tempo médio de reparo (MTTR) e o menor tempo médio entre falhas (MTBF) contribuíram para que a Máquina de Embalagem 1 apresente-se a menor disponibilidade entre o conjunto de máquinas, estando disponível para a operação em 99,57% do tempo. Para o modelo de Weibull, dado um tempo t qualquer, por exemplo, $t = 100$ horas, tem-se que a confiabilidade da Máquina 1 funcionar ao menos 100 horas é de aproximadamente 19,04%, (menor confiabilidade entre o conjunto de máquinas), 80,96% de falhar antes deste tempo e 50% das falhas ocorrem em até de 25 horas de funcionamento, o menor tempo entre o conjunto de máquinas.

A Máquina de Embalagem 2 apresenta tempo médio de reparo (MTTR) de 15,5 minutos (0,26 horas) e tempo médio entre falhas (MTBF) de 102 horas, o segundo maior tempo. O resultado do parâmetro de forma do modelo de Weibull para a Máquina 2 aponta taxa de falha decrescente ($\gamma = 0,69$), o que sugere que o equipamento se encontra na fase de mortalidade infantil da curva da banheira, já que $\gamma < 1$, indicando também a estratégia de manutenção corretiva para se encontrar e eliminar as falhas de origem, reforçando os itens que falharam (SELLITTO, 2005). A Máquina de Embalagem 2 esteve disponível para operação em 99,75%. Dado um tempo $t = 100$ horas, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 100 horas é de aproximadamente 31,03%, ou seja, existe probabilidade de 68,97% de a

máquina não funcionar até este tempo. Aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em até 47 horas de operação.

A Máquina de Embalagem 3 apresenta tempo médio de reparo de 12,9 minutos (MTTR = 0,21 horas), o menor tempo entre o conjunto de máquinas. O tempo médio entre falhas é de 82 horas (MTBF = 82). O parâmetro de forma do modelo Weibull é igual a 0,66 indicando taxa de falha decrescente, pois este é menor que 1 ($\gamma < 1$), posicionando o equipamento na fase de mortalidade infantil da curva da banheira, indicando também a estratégia de manutenção corretiva (SELLITTO, 2005), na busca pela eliminação das falhas de origem que podem ser causadas por mau projeto, má instalação, má operação ou má fabricação de componentes, reforçando assim os componentes que falharam. Em 99,74% do tempo o equipamento esteve disponível para operação. A probabilidade deste equipamento funcionar até um tempo $t = 100$ horas é de aproximadamente 25,07%, 74,93% de falhar antes deste tempo e 50% das falhas ocorrem antes de 35 horas de funcionamento.

A Máquina de Embalagem 4 apresenta tempo médio de reparo de 15,8 minutos (MTTR = 0,26 horas) e tempo médio entre falhas de 87 horas (MTBF = 87). Com $\gamma = 0,57$ (parâmetro de forma de Weibull) pode-se inferir que o equipamento apresenta taxa de falha decrescente e, como $\gamma < 1$, pode-se posicionar o equipamento na fase de mortalidade infantil curva da banheira. Assim, de acordo com Sellitto (2005) a melhor estratégia de manutenção sugerida é a corretiva, com o intuito de se encontrar as falhas de origem, reforçando os itens que apresentaram falha em decorrência de possível má operação, instalação ou deficiências de projeto e/ou qualidade de componentes de reposição. A Máquina de Embalagem 4 esteve disponível para operação em 99,70% do tempo. De acordo com o modelo de Weibull, dado um tempo $t = 100$ horas, a confiabilidade da Máquina 4 funcionar por pelo menos 100 horas é de aproximadamente 24,05%, 75,95% de falhar até este tempo e 50% das falhas ocorrem antes de 28 horas em funcionamento.

A Máquina de Embalagem 5 apresenta tempo médio de reparo de 13,4 minutos (MTTR = 0,22 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) é de 91 horas. O parâmetro de forma do modelo Weibull é de 0,60 o que indica que o equipamento se encontra na fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira, com taxa de falha decrescente. Sellitto (2005) indica como estratégia de manutenção para esta fase a manutenção corretiva, reforçando os itens que falharam e buscando identificar as falhas de origem. A Máquina de Embalagem 5 apresenta disponibilidade para a operação de 99,76% do tempo. Para um tempo $t = 100$, a confiabilidade do equipamento permanecer funcionando por pelo menos até este

tempo é de 26,01%, 73,99% de falhar antes disso e 50% das falhas ocorrem antes de 33 horas de operação.

A Máquina de Embalagem 6 apresenta tempo médio de reparo (MTTR) de 13,6 minutos (0,23 horas) e tempo médio entre falhas (MTBF) de 125, o maior entre o conjunto de máquinas. Assim como as demais máquinas, apresenta parâmetro de forma $\gamma = 0,72$, apresentando taxa de falha decrescente e também pode ser posicionada na fase de mortalidade infantil da curva da banheira, sendo sugerida, de acordo com Sellitto (2005), a estratégia de manutenção corretiva, reforçando os itens que apresentaram falha e, em seguida, busca-se identificar e eliminar as causas das falhas de origem, que podem ser causadas por problemas de projeto, instalação ou operação inapropriada. A Máquina de Embalagem 6 é o equipamento com a maior disponibilidade entre o conjunto de máquinas, estando disponível para a operação em 99,82% do tempo. Dado um tempo $t = 100$ horas, a confiabilidade da máquina funcionar por pelo menos este tempo é de aproximadamente 37,34%, sendo o equipamento com a maior confiabilidade entre o conjunto de máquinas. A probabilidade de apresentar falha antes de $t = 100$ horas é de 62,66% e 50% das falhas ocorrem antes de 61 horas de funcionamento, o maior tempo entre o conjunto de máquinas.

7.1 Discussão

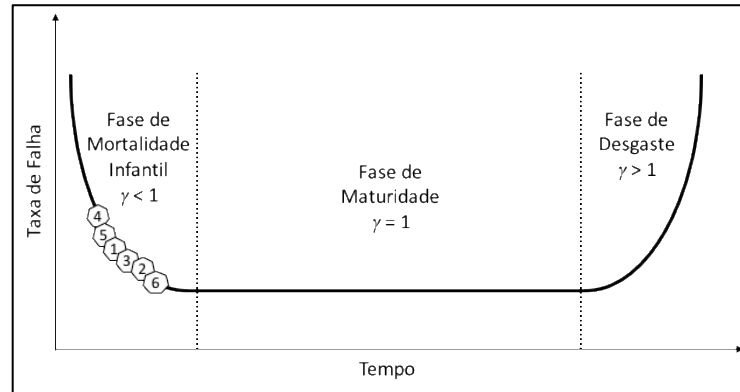
Esta seção discute como os resultados da pesquisa podem ser utilizados na gestão da manutenção dos equipamentos.

A curva da banheira representa genericamente a função de risco $h(t)$ ao longo do ciclo de vida dos equipamentos (CERVEIRA; SELLITTO, 2015).

Passo 11 – Posicionamento na Curva da Banheira (Procedimentos Operacionais)

Obteve-se parâmetro de forma $\gamma < 1$ para todas as máquinas, o que remete à taxas de falha decrescentes. Com isso, assume-se que o conjunto das 6 máquinas de embalagens estudadas se encontram na fase de mortalidade infantil. A provável posição das máquinas na curva da banheira é apresentada na Figura 22.

Figura 22 – Posição das máquinas na curva da banheira



Fonte: Adaptado de Sellitto (2005)

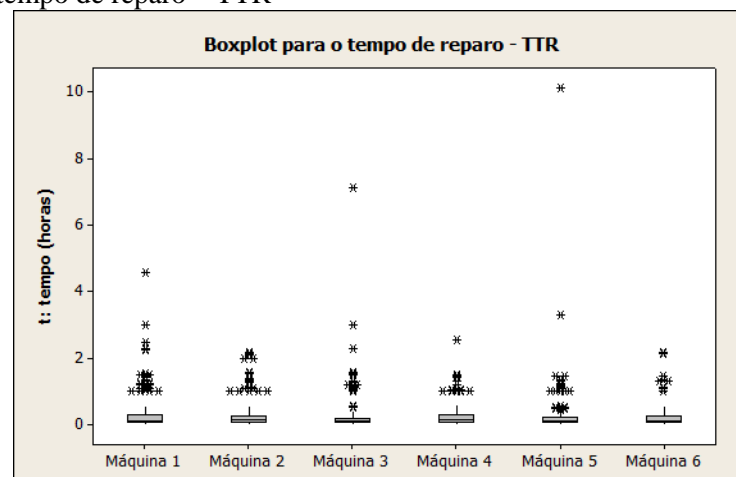
Desse modo, segundo Sellitto (2005), a melhor estratégia de manutenção para esta fase do ciclo de vida dos equipamentos é a manutenção corretiva, pois nesta fase, ocorrem as falhas prematuras causadas principalmente por má especificação, mau projeto, má instalação ou por má qualidade na fabricação de componentes de reposição, assim uma estratégia corretiva identifica e corrige estas deficiências de origem, não se limitando apenas a corrigir as falhas aparentes.

Passo 12 – Evidenciando Alta Dispersão dos Tempo (Procedimentos Operacionais)

Os coeficientes de variação (CV) para o tempo de reparo (TTR) e tempo entre falhas, (TBF) apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente, demonstram alta variação nestes tempos, ($CV > 1$), que pode ser comprovado a partir das faixas dos intervalos de confiança (IC 95%) para os tempos.

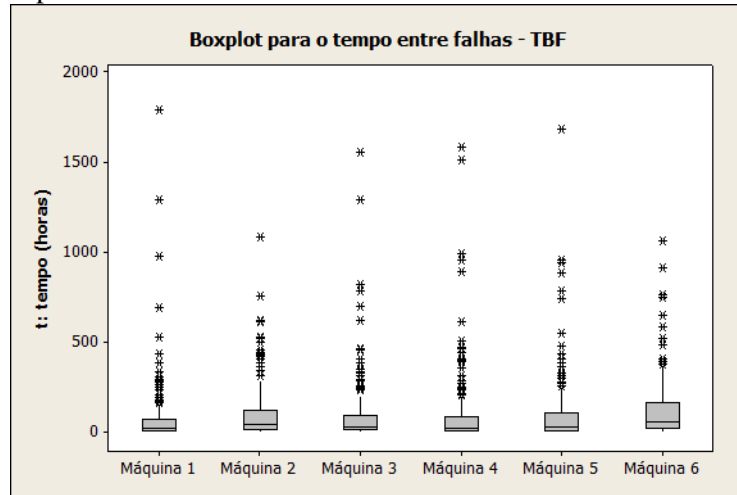
Isso ocorre porque estes tempos apresentam muitos *outliers* (observações com valores extremos, muito distantes das médias), conforme Figuras 23 e 24. As Figuras 25 e 26 apresentam a concentração do tempo de reparo e tempo entre falhas nos períodos iniciais da linha do tempo.

Figura 23 – Boxplot – tempo de reparo – TTR



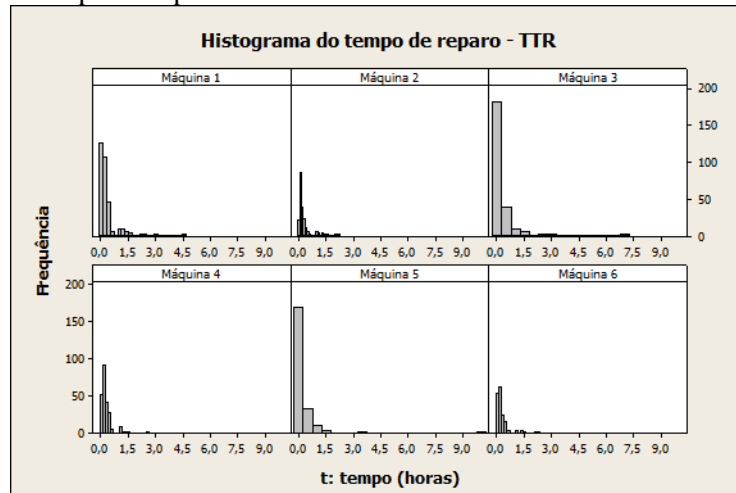
Fonte: Próprio autor

Figura 24 – Boxplot – tempo entre falhas – TBF



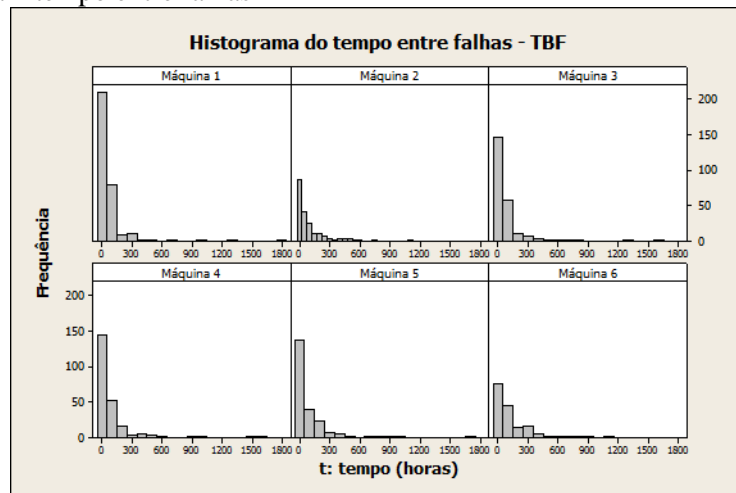
Fonte: Próprio autor

Figura 25 – Histograma – tempo de reparo – TTR



Fonte: Próprio autor

Figura 26 – Histograma – tempo entre falhas – TBF



Fonte: Próprio autor

Passo 13 – Comparação das Máquinas 1 e 6 (Procedimentos Operacionais)

Conforme mencionado na seção 6.2, as Máquinas de Embalagem 1 e 6 são do mesmo modelo (Speed) e possuem a mesma capacidade de produção (80 pct/min). Ambos equipamentos entraram em operação no mesmo momento e operam sob as mesmas condições. Exceção às Máquinas de Embalagem 3 e 4 que são do modelo V3 com capacidade de produção de 40 pct/min e estão em operação há cerca de 15 anos na planta fabril.

Com base nos resultados pode-se dar destaque as Máquinas de Embalagem 1 e 6. O destaque da Máquina 1 é em função desta ser o equipamento que apresenta os piores indicadores entre o conjunto de máquinas estudado. Maior tempo médio de reparo, 16,2 minutos (MTTR = 0,27 horas), menor tempo médio entre falhas (MTBF = 63 horas), menor disponibilidade operacional 99,57%, menor confiabilidade 19,04% (para um tempo $t = 100$ horas) e menor tempo onde 50% das falhas ocorrem (25 horas). A Máquina de Embalagem 1

também é o equipamento que apresentou o maior número de falhas no período estudado, conforme Figura 6, foram 314 falhas (18,8% do total e apresenta 33,05% mais falhas que a Máquina 3, a segunda em quantidade de falhas).

A Máquina de Embalagem 6 é o único equipamento onde o parâmetro de forma é mais próximo a 1 ($\gamma = 0,72$), indicando uma possível transição para a fase de maturidade da curva da banheira. Mengue e Sellitto (2013) argumentam que a migração do equipamento ao longo da curva da banheira em direção à fase de maturidade é um indicador de sucesso das ações de manutenção e que poderão ser revisadas e estendidas no tempo e a outros equipamentos. A Máquina de Embalagem 6 é também o equipamento que apresenta os melhores indicadores entre o conjunto de máquinas. Tempo médio entre falhas (MTBF) de 125 horas, junto com a Máquina 3, que apresenta MBTF = 102 horas, são os únicos equipamentos a ultrapassarem as 100 horas de funcionamento médio entre as falhas. O tempo médio de reparo da Máquina 6 é de 13,6 minutos (MTTR = 0,23 horas), o terceiro melhor do conjunto de máquinas estudado. A Máquina de Embalagem 6 apresenta a maior disponibilidade, ficando 99,82% do tempo disponível para a operação. Apresenta também a maior confiabilidade de funcionamento, 37,34%, dado um tempo $t = 100$ horas, além de apresentar o maior tempo em que 50% das falhas ocorrerão, 61 horas.

O registro dos dados de paradas de máquinas no banco de dados da empresa, carece de detalhamento sobre informações acerca do tipo de falha ocasionada (Modos de Falhas), pois, como o campo para o registro é de texto livre, não há padronização na descrição da causa da parada, além da falta de dados detalhados sobre os manutentores (ativos e não mais ativos, que prestaram o serviço de manutenção à época da ocorrência da falha), dificultando assim um entendimento mais aprofundado das falhas de origem.

Um refinamento e padronização no registro das causas das paradas é necessário para se identificar os modos de falhas de cada equipamento, permitindo assim, a análise dos componentes do equipamento como covariáveis explicativas das falhas da máquina como um sistema. Por exemplo, seria interessante saber quantas falhas ocorreram em função da quebra ou falha de determinados componentes, ou então, saber de que forma algum ou alguns componentes influenciam o ciclo de vida do equipamento.

Autores como Sellitto (2005), Mengue e Sellitto (2013), Diedrich e Sellitto (2014), Machado e Andrade (2013) e Cerveira e Sellitto (2015) apontam para a importância da quantidade e qualidade do registro dos dados das atividades de manutenção nos estudos de confiabilidade, para os gestores da manutenção poderem inferir e decidir corretamente, além de desenvolver modelos que melhor se enquadrem ao sistema estudado.

Para Machado e Andrade (2013), o estudo dos modos de falha é importante na análise de confiabilidade não só para identificar os modos com maior frequência de ocorrência, mas também para se identificar as falhas que apresentam maior severidade ou que acarretam tempos de reparo mais elevados, pois podem apresentar perda de produtividade associada.

A falta de padronização no registro dos modos de falha para o conjunto das 6 máquinas de embalagem inviabilizou um estudo mais aprofundado para se identificar quais fatores influenciaram para que a Máquina de Embalagem 1 apresentasse os piores indicadores, comparados com os indicadores da Máquina de Embalagem 6 (que apresentou os melhores valores), dado que ambos equipamentos são do mesmo modelo (Speed), operando sob as mesmas condições.

7.2 Comparação da Estratégia Atual vs. Estratégia Indicada Pela Pesquisa

Passo 14 – Comparação da Modelagem vs. Atual Estratégia (Procedimentos Operacionais)

A engenharia de Manutenção da empresa adota a estratégia de manutenção preventiva periódica mesclada com a estratégia preventiva condicionada ao estado dos componentes.

As manutenções preventivas são executadas 1 vez por mês e a troca de componentes é feita somente se o estado destes apresentar sinais de desgastes, fadiga ou deterioração e, as falhas entre manutenções preventivas são removidas através de reparações mínimas.

Além disso, a estratégia de manutenção é a mesma para todos os equipamentos da linha de produção e as atividades de manutenção são executadas pela mesma equipe de manutentores.

Para Carvalho (2012), políticas de manutenção preventiva periódica são mais fáceis de implementar, pois as ações de manutenção acontecem em intervalos de tempo fixo, porém podem apresentar custos superiores.

Para Kardec e Nascif (2009) a estratégia de manutenção preventiva programada é adequada para equipamentos que apresentam ciclo de vida descrito pela curva de falha do Tipo A (curva da banheira) ou Tipo B, se estes forem equipamentos mais simples e padrões de falha com idade de desgaste forem identificáveis. Ainda para os autores, a manutenção preventiva deve ser adotada nos casos em que: a manutenção preditiva não puder ser adotada, quando houver risco à segurança pessoal ou operacional, quando há oportunidades de ganhos em equipamentos críticos de difícil liberação ou quando houver risco ao meio ambiente.

Para Sellitto (2005) a escolha da estratégia de manutenção preventiva para equipamentos que se encontram na fase de mortalidade infantil da curva da banheira pode

implicar na perpetuidade do equipamento nesta fase, pois acaba-se trocando os componentes que não apresentam falha de origem.

Para Cerveira e Sellitto (2015), a estratégia de manutenção preventiva pode diminuir a confiabilidade do equipamento, pois, quando se faz manutenção sem que exista defeito, pode-se introduzir a possibilidade de surgimento de defeitos não existentes, decorrentes de falha humana, falha de sobressalentes ou falhas nas atividades de manutenção. Para Kardec e Nascif (2009), pode-se ainda incorrer em aumento no custo de manutenção ao se trocar componentes prematuramente.

Os resultados da modelagem da pesquisa demonstram que os equipamentos se encontram na fase de mortalidade infantil, o que, segundo Sellitto (2005) sugere a escolha da estratégia de manutenção corretiva, com o objetivo de se identificar e eliminar as falhas de origem, que nesta fase podem ser ocasionadas devido a mau projeto, má instalação, má fabricação de componentes sobressalentes ou má operação.

Santos e Sellitto (2016) alertam que a adoção da estratégia de manutenção corretiva com o objetivo de se eliminar as causas de origem, normalmente ocasionadas por falhas de projeto ou de instalação, para equipamentos que se encontram na fase de mortalidade infantil, implica em altos investimentos em melhorias nos equipamentos e longos tempos de indisponibilidade para reformas e melhorias que eliminem as falhas estruturais detectadas.

Kardec e Nascif (2009) apontam que a taxa de mortalidade infantil será tanto maior quanto pior for o trabalho desenvolvido nas fases que antecedem a entrada em operação de qualquer equipamento ou sistema (fase de projeto ou instalação), tendo como consequências a baixa confiabilidade e lucros cessantes para a planta, recaindo sobre a Manutenção, na maioria das vezes, o ônus do trabalho mal feito nestas etapas.

Para Moubray (1997) se um determinado equipamento não possui um modo predominante e característico de falha, revisões programadas podem pouco contribuir para aumentar a confiabilidade e, neste caso, a estratégia de manutenção preventiva é pouco eficaz.

Desse modo, evidencia-se a importância do registro de modos de falhas no sistema de gestão da empresa objeto deste estudo, contribuindo assim para a melhor escolha das atividades de manutenção corretiva, preventiva e preditivas.

Pode-se entender que o atual foco da manutenção é a preservação do equipamento como item físico e não como função produtiva que este exerce no sistema.

Nesse sentido, a Engenharia de Manutenção pode adotar a metodologia da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), pois para a manutenção desempenhar sua função estratégica, esta deve estar voltada para os resultados da empresa, não sendo suficiente

reparar o equipamento o mais rápido possível, mas sim, manter sua função disponível para operação pelo maior tempo possível e reduzir a probabilidade de paradas não planejadas (CERVEIRA; SELBITTO, 2015).

Ainda de acordo com Cerveira e Sellitto (2015), a utilização da RCM pode resultar na redução de manutenção preventiva e seus respectivos custos.

Como sugestões de melhorias para a definição de estratégias de manutenção para a empresa objeto de estudo temos:

1. A aquisição de um sistema de gestão da manutenção que gerencie dados mais detalhados e padronizados das ações de manutenção;
2. Na impossibilidade de aquisição de um novo sistema de gestão da manutenção, sugere-se a realização de melhorias no atual sistema, de modo que este possa melhor gerenciar dados de modos de falha e dados dos manutentores;
3. Definição de estratégias de manutenção para os equipamentos com base na análise de confiabilidade, considerando o comportamento da curva de falhas, especificidades e peculiaridades de cada equipamento e, no limite, de cada modo de falha;
4. A contratação ou formação de um especialista em análise de confiabilidade;
5. Adoção da metodologia da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), de modo que a Engenharia de Manutenção esteja dotada de ferramentas e métodos estruturados (qualitativos e quantitativos) que auxiliem na definição de estratégias de manutenção que garantam uma abordagem ótima para redução de gastos financeiros e custo total do ciclo de vida de equipamentos.

8 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a coerência da atual estratégia de manutenção para os equipamentos produtivos de uma empresa da indústria alimentícia por meio do uso de funções de confiabilidade. Isso foi possível com a definição da posição dos equipamentos no ciclo de vida da curva da banheira. Como método de pesquisa, o trabalho se apoiou na modelagem estatística através do emprego da análise de confiabilidade aos dados de tempo de reparo (TTR) e tempo entre falhas (TBF).

Os dados foram originados do histórico de paradas, registrados e gerenciados pela Engenharia de Manutenção da empresa estudada.

Percebe-se a importância de se ter o registro destas informações feito com qualidade, para que o desenvolvimento de estudos deste tipo de atividade possa trazer aos gestores da manutenção de equipamentos resultados confiáveis, possibilitando a inferência e decisão correta de ações que proporcionem melhor eficiência e competitividade para a empresa.

A modelagem dos dados foi realizada com o auxílio do software Minitab® versão 16, software para análise estatística dotado de ferramentas para a modelagem de dados de confiabilidade

Pela análise gráfica oferecida pelo Minitab®, as distribuições de probabilidade dos modelos Log-normal e Weibull, descreveram razoavelmente a amostra de dados de tempo de reparo (TTR) e tempo entre falhas (TBF), respectivamente, para o conjunto das 6 máquinas de embalagem.

O resultado da modelagem de confiabilidade dos dados de tempo entre falhas (TBF) através do modelo Weibull, demonstrou que todos os equipamentos estudados se encontram na fase de mortalidade infantil da curva da banheira, pois apresentaram parâmetro de forma $\gamma < 1$.

Além disso, com coeficientes de variação (CV) maiores que 1, foi possível identificar que os dados de tempo de reparo e tempo entre falhas, apresentam grande dispersão, sugerindo o estudo mais aprofundado de covariáveis explicativas, como por exemplo, os modos de falha dos equipamentos.

Através dos resultados obtidos pode-se observar que a estratégia de manutenção preventiva, adotada atualmente para os equipamentos, não está adequada para a posição que estes se encontram na curva da banheira. A mortalidade infantil, apontada no resultado, sugere a manutenção corretiva, a qual, segundo Sellitto (2005), buscaria as reais causas dos possíveis defeitos de fabricação, de projeto, de instalação ou de operação e as eliminaria.

Desse modo, o erro de projeto ou fabricação deve ser reconhecido e bloqueado, se não for possível eliminá-lo.

A consequência da não realização da manutenção corretiva é a permanência dos equipamentos na fase de mortalidade infantil, impossibilitando estes de entrarem na região de maturidade ou vida útil do equipamento.

A falta de padronização no registro das causas das paradas dos equipamentos impossibilitou a identificação dos modos de falhas dos equipamentos, reduzindo a possibilidade de identificação de itens componentes como covariáveis explicativas do tempo de vida dos equipamentos.

Por fim, a análise de confiabilidade mostrou-se ser uma ferramenta robusta de auxílio aos tomadores de decisão na atividade de definição de estratégias de manutenção mais adequadas para os equipamentos.

A confiabilidade impacta diretamente na segurança, no meio ambiente, na produção e nos custos, em um ambiente de elevada competitividade, a confiabilidade é fator primordial para a redução dos custos operacionais.

8.1 Trabalhos futuros

O foco deste trabalho foi um conjunto de 6 máquinas de embalagem localizadas na linha 07 de produção. Como trabalho futuro, seria interessante o estudo de confiabilidade dos modos de falha de cada equipamento, com o intuito de se entender como as falhas ocorrem.

Uma outra abordagem, poderia ser a análise de confiabilidade da linha de produção como um todo, individual ou em comparação com as demais linhas.

Além disso, uma análise das máquinas de embalagem de outras linhas de produção poderia ser empregada, com o objetivo de comparar a confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade, procurando descobrir fatores comuns da ocorrência de falhas.

Percebe-se que o potencial de realização de trabalhos na engenharia de manutenção empregando o uso da análise de confiabilidade é bastante grande.

REFERÊNCIAS

- AFEFY, I.H. Reliability-centered-maintenance methodology and application: a case study. **Engineering**, v. 2, n. 11, p. 863, 2010.
- BARABADY, J.; KUMAR, U. Reliability analysis of mining equipment: a case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 93, n. 4, p. 647-653, 2008.
- BATALHA, M.O. **Introdução à Engenharia de Produção**. Rio de Janeiro. Elsevier, 2008.
- BRAND, G.G. **Método de apoio à formulação de estratégia de manutenção em ambiente industrial: um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Vale dos Sinos. 113 p., São Leopoldo, 2011.
- BRAUER, D.C.; BRAUER, G.D. Reliability-centered maintenance. **IEEE Transactions on reliability**, v. 36, n. 1, p. 17-24, 1987.
- CARRETERO, J.; PEREZ, J.M.; GARCIA-CARBALLEIRA, F.; CALDERON, A.; FERNANDEZ, J. GARCIA, J.D.; LOZANO, A.; CARDONA, L.; COTAINA, N.; PRETE, P. Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 82, n. 3, p. 257-273, 2003.
- CARVALHO, M.T.B. **Análise e avaliação de períodos de inspeção em sistemas de natureza tecnológica**. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial e de Sistemas) – Universidade do Minho – Escola de Engenharia. 267 p., Guimarães, Portugal, 2012.
- CAUCHICK MIGUEL, P.A. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2ª edição. Rio de Janeiro. Elsevier: ABREPO, 2012.
- CERVEIRA, D.S; SELLITTO, M.A. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise quantitativa de um forno elétrico a indução. **Produção Online**, v. 15, n. 2, p. 405-432, 2015.
- CERVO, A.L; BERVIAN, P.A. **Metodologia Científica**. 5ª edição. São Paulo. Prentice hall, 2002.
- COLOSIMO, E.A; GIOLO, S.R. **Análise de Sobrevivência Aplicada**. São Paulo. Blucher, 2006.
- COX, D.R. Regression models and life-tables. **Journal of Royal Statistical Society. Series B** (Methodological), v. 34, n. 2, p. 187-220, 1972.
- DHILLON, B.S. **Engineering Maintenance**. A modern approach. CRC Press. Boca Raton, Florida, 2002.
- DHILLON, B.S. **Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers**. Taylor & Francis Group. 2006.
- DIAS, A. **Confiabilidade na manutenção industrial**, 2010.
<http://docplayer.com.br/3238650-Confiabilidade-na-manutencao-industrial.html>, acessado em: 27/mar/2016.

DIEDRICH, A.; SELBITTO, M.A. Manutenção centrada em confiabilidade - estudo de caso na indústria de bebidas, **Revista Eletrônica Produção em Foco**, v. 4, n. 1, 2014.

EBELING, C.E. **An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering**. McGraw-Hill Companies. 1997.

FARRERO, J.C.; TARRÉS, L.G.; LOSILLA, C.B. Optimization of replacement stocks using a maintenance programmer derived from reliability studies of production systems. **Industrial Management & Data Systems**, v. 102, n. 4, p. 188-196, 2002.

FRASER, K; HVOLBY, H.H; TSENG, T.L. Maintenance management models: a study of the published literature to identify empirical evidence. a greater practical focus is need. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 32, n. 6, p. 635-664. 2015.

HORNER, R.M.W; EL-HARAM, M.A.; MUNNS, A.K. Building maintenance strategy: a new management approach. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 3, n. 4, p. 273-280, 1997.

IRESON, W.G; COOMBS, C.F; MOSS, R.Y. **Handbook of Reliability Engineering and Management**. 2ª edição. McGraw-Hill, 1995.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 3ª edição. Rio de Janeiro. Qualitymark : Petrobras, 2009.

KECECIOGLU, D. **Reliability Engineering Handbook**, Volume 1. DEStech Publications, 2002a.

KECECIOGLU, D. **Reliability Engineering Handbook**, Volume 2. DEStech Publications, 2002b.

KLUTKE, G.A.; KIESSLER, P.C.; WORTMAN, M.A. A critical look at the bathtub curve. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 52, n. 1, 2003.

KOTLER, P; KELLER, K.L. **Administração de Marketing**. 12ª edição. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2006.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões**. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2009).

LEAL, O.P; BAFFA, P; GARCIA, H.L. Otimização da frequência na manutenção preventiva. **XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Fortaleza**, 2006.

LEWIS, E.E. **Introduction to Reliability Engineering**. John Wiley & Sons, 1994.

LIBEROPOULOS, G.; TSAROUHAS, P. Reliability analysis of an automated pizza production line. **Journal of Food Engineering**, v. 69, n. 1, p. 79-96, 2005.

MACHADO, F; ANDRADE, J.J.O. Emprego da confiabilidade para o estabelecimento de estratégias de manutenção na indústria metal-mecânica. **XXXIII Encontro Nacional De Engenharia de Produção, ENEGEP**. 2013.

- MARCONI, M.A; LAKATOS, E.M. **Técnicas de Pesquisa: planejamento e execução de pesquisas**, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados. Atlas, 2003.
- MENDES, A.A. **Manutenção centrada em confiabilidade: uma abordagem quantitativa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 85 p. Rio Grande do Sul, 2011.
- MENDES, A.A.; RIBEIRO, J.L.D. Um estudo do suporte quantitativo necessário para a operacionalização da MCC. **Prod.**, São Paulo, v. 21, n. 4, p. 583-593, 2011.
- MENDES, A.A.; RIBEIRO, J.L.D. Estabelecimento de um plano de manutenção baseado em análises quantitativas no contexto da MCC em um cenário de produção JIT. **Production**, v. 24, n. 3, p. 675-686, July/sept, 2014.
- MENGUE, D.C; SELBITTO, M.A. Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. **Revista Produção Online**, v. 13, n. 2, p. 759-783, 2013.
- MENON, M.V. Estimation of the shape and scale parameters of the Weibull distribution. **Technometrics**, v. 5, n. 2, p. 175-182, 1963.
- MOBLEY, R. Keith. **An Introduction to Predictive Maintenance**. Butterworth-Heinemann, 2002.
- MOBLEY, R. Keith. **Maintenance Engineering Handbook**. 7^a edição. McGrawHill, 2008.
- MOUBRAY, J. **Reliability-Centered Maintenance**. Industrial Press. New York, 1997.
- PADOVEZE, C.L. **Controladoria Estratégica e Operacional: conceitos, estrutura, aplicação**. São Paulo, Thomson Learning, 2007.
- PIZZOLATO, N.D.; GANDOLPHO, A.A. **Técnicas de Otimização**. Rio de Janeiro. LTC, 2013.
- RAMOS, F.V.; VIEIRA, I.A.; SILVA, N.F.; PEREIRA, A.R. Estratégia de manutenção por meio de análises confiabilidade em uma rede de energia elétrica. **XXXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP**. 2014.
- RAMOS FILHO, J.A.R.; ATAMANCZUK, M.J.; MARÇAL, R.F.M. Seleção de técnicas de manutenção para o processo de armazenagem pelo método de análise hierárquica. **Produção Online**, v.10, n. 1, p. 142-166. 2010.
- RAPOSO, C. Overall equipment effectiveness: aplicação em uma empresa do setor de bebidas do polo industrial de Manaus. **Revista Produção Online**, v. 11, n. 3, p. 648-667. 2011.
- RAUSAND, M. **System Reliability Theory: models and statistical methods**. J. Wiley, 1994.
- RAUSAND, M. Reliability centered maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 60, n. 2, p. 121-133. 1998.

RAUSAND, M; OIEN, K. The basic concepts of failure analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v.53, p. 73-83. 1996.

REIS, C.S. **Metodologia de análise de confiabilidade de equipamentos médico-assistenciais na fase de utilização**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. 160 p. Florianópolis, 2014.

SANTOS, W.B.; COLOSIMO, E.A.; MOTTA, S.B. Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório. **Gest. Prod.** São Carlos, v. 14, n. 1, p. 193-202, jan/abr 2007.

SANTOS, N.A; SELLITTO, M.A. Estratégia de manutenção e aumento da disponibilidade de um posto de compressão de gases na indústria petrolífera. **Revista Produção Online**, v. 16, n. 1, p. 77-103, jan/mar 2016.

SELLITTO, M.A; BORCHARDT, M; ARAUJO, D.R.C. Manutenção centrada em confiabilidade: aplicando uma abordagem quantitativa. **XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP**. 2002.

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

SELLITO, M.A. Análise estratégica da manutenção de uma linha de fabricação metal-mecânica baseada em cálculos de confiabilidade de equipamentos. **Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 2, n. 2, p. 97, 2007.

SIQUEIRA, I.P. **Manutenção Centrada na Confiabilidade**: manual de implementação. Qualitymark, 2003.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R.. **Administração da Produção**. Atlas, 2002.

SRIKRISHNA, S.; YADAVA, G.S.; RAO, P.N. Reliability-centered maintenance applied to power plant auxiliaries. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 12, n. 3, p. 205-238, 1996.

TOBIAS, P.A; TRINDADE, D.C. **Applied Reliability**. 3th edition. Taylor & Francis Group, 2011.

TSAROUHAS, P.H. Reliability, availability and maintainability analysis in food production lines: a review. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 47, n. 11, p. 2243-2251, 2012.

TSAROUHAS, P.H; VARZAKAS, T.H; ARVANITOYANNIS, I.S. Reliability and maintainability analysis of strudel production line with experimental data – a case. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 2, p. 250-259, 2009.

TSAROUHAS, P.H; ARVANITOYANNIS, I.S; VARZAKAS, T.H. Reliability and maintainability analysis of cheese (feta) production line in a Greek medium-size company: A case study. **Journal of Food Engineering**, v. 94, n. 3, p. 233-240, 2009.

TSAROUHAS, P.H; ARVANITOYANNIS, I.S; AMPATZIS, Z.D. A case study of investigating reliability and maintainability in a Greek juice bottling medium size enterprise (MSE). **Journal of Food Engineering**, v. 95, n. 3, p. 479-488, 2009.

VACCARO, G.L.R. **Modelagem e análise da confiabilidade de sistemas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 222 p. Rio Grande do Sul, 1997.

VAZ, J.C. **Manutenção de sistemas produtivos: um estudo sobre a gestão da disponibilidade de equipamentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 203 p. São Paulo, 2003.

VIANA, H. **PCM: Planejamento e Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro. Qualitymark, 2002.

WILMETH, R.G; USREY, M.W. Reliability-centered maintenance: a case study. **Engineering Management Journal**, v. 12, n. 4, p. 25-31, 2000.

YSSAAD, B; KHIAT, M; CHACKER, A. Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 55, p. 108–115, 2014.