UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

AUGUSTO CÉSAR DE JESUS SANTOS

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA MODELAGEM DA MANUTENÇÃO E INSERÇÃO DO CUSTO EM ESTADO DEFEITUOSO EM MODELOS DELAY TIME PARA COMPONENTE SIMPLES E PARA SISTEMA MULTICOMPONENTE

Recife
2019

AUGUSTO CÉSAR DE JESUS SANTOS

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA MODELAGEM DA MANUTENÇÃO E INSERÇÃO DO CUSTO EM ESTADO DEFEITUOSO EM MODELOS DELAY TIME PARA COMPONENTE SIMPLES E PARA SISTEMA MULTICOMPONENTE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.

Recife

2019

Catalogação na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S237p Santos, Augusto César de Jesus.
Proposta de metodologia para modelagem da manutenção e inserção do custo em estado defeituoso em modelos delay time para componente simples e para sistema multicomponente / Augusto César de Jesus Santos. - 2019.
122 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2019.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia de Produção. 2. Modelagem em manutenção. 3. Metodologia para modelagem. 4. *Delay time*. 5. Custo em estado defeituoso. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virgínio. (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.) BCTG/2019-139

AUGUSTO CÉSAR DE JESUS SANTOS

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA MODELAGEM DA MANUTENÇÃO E INSERÇÃO DO CUSTO EM ESTADO DEFEITUOSO EM MODELOS DELAY TIME PARA COMPONENTE SIMPLES E PARA SISTEMA MULTICOMPONENTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em engenharia de produção.

Aprovada em: 22/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Profª. Drª. Danielle Costa Morais (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Osvaldo Luiz Gonçalves Quelhas (Examinador Externo)
Universidade Federal Fluminense

Este trabalho é dedicado às pessoas que sempre confiaram em mim: minha mãe **Ana Maria**, meu pai **João Pereira**, e meus irmãos **João Paulo**, **Pollianna Jamilles** e **Hianna Paulla.**

AGRADECIMENTOS

A Deus por me abençoar diariamente e guiar meus passos, por estar ao meu lado e me ajudar a seguir a vida com dignidade, humildade e coragem.

Aos meus pais João Pereira e Ana Maria, por tudo que sou, pelo amor, amizade, apoio, incentivo e confiança de sempre, por terem me dado uma educação de qualidade em casa e fora dela, por sempre apoiarem meus cursos, meus projetos e minha vida.

Aos meus irmãos João Paulo, Pollianna Jamilles e Hianna Paulla, por serem tão companheiros e estarem sempre ao meu lado.

Ao meu orientador Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante, exemplo de pessoa, professor e pesquisador. Agradeço pela atenção dada a este trabalho, por confiar em mim e por me orientar com dedicação e paciência.

Aos membros da banca avaliadora, professora Danielle Morais e professor Osvaldo Quelhas, pelas valiosas sugestões de melhoria para a versão final da dissertação.

À Margareth Malta, bibliotecária do CTG (UFPE), pelo apoio na formatação final do trabalho e nos ajustes necessários para entrega na biblioteca.

À CAPES por me fornecer apoio financeiro durante o período do Mestrado.

Aos amigos do laboratório RANDOM, pela amizade construída, pelo ótimo ambiente de trabalho e pelo compartilhamento de conhecimentos.

Aos professores do PPGEP-UFPE com os quais tive a oportunidade de conviver e aprender durante as disciplinas, pela contribuição em minha formação.

Aos meus antigos orientadores em trabalhos acadêmicos, professores: André Leite Rocha, Bruna Rosa de Barros, e Glessia Silva de Lima, os quais sempre me incentivaram e contribuíram para a minha formação.

A minha namorada Laryssa Andrade, por todo apoio, atenção, companheirismo, incentivo e confiança.

Aos meus amigos Daone, Kelvin, Helaelson e Ewerthon por sempre torcerem bastante pelo meu sucesso e me apoiarem.

A todas as pessoas que em algum momento me ajudaram. São muitas, mas não me esqueço.

RESUMO

Apesar do desenvolvimento de modelos em manutenção ter ocorrido de forma tardia em relação aos modelos de produção, este tipo de modelagem representa atualmente uma possibilidade de melhoria efetiva nos aspectos operacionais e estratégicos das indústrias, contribuindo para um melhor posicionamento competitivo. No entanto, os modelos desenvolvidos às vezes não fornecem uma boa representação da realidade ou são excessivamente complexos, desencorajando a aplicação na prática. Nesse contexto, esta dissertação propõe o desenvolvimento de uma metodologia para a modelagem da manutenção que engloba tanto o processo de identificação e solução do problema, bem como a implementação prática da solução. Essa metodologia é baseada em uma integração de abordagens anteriormente propostas, mas aplicadas de forma isolada. Como resultado, a metodologia consegue apontar formas de caracterização do caso em estudo, direcionar a (re)formulação matemática de modelos e guiar o processo de implementação prática da solução na realidade. Além disso, este estudo propõe, de forma mais específica, modificações em modelos *delay time* para componente simples e para sistema multicomponente, ampliando suas possibilidades de aplicação para contextos recorrentes em muitas situações práticas. Esses contextos se referem às situações em que o tempo em estado defeituoso interfere negativamente no desempenho do componente ou sistema, por meio da redução de sua eficiência ou afeta negativamente no reparo e reciclagem do item, para sua posterior reutilização. Nesse sentido, as modelagens propostas possibilitam que um custo relativo ao tempo de permanência em estado defeituoso seja inserido nos modelos *delay time* analisados. Por fim, a contribuição deste trabalho é destacada de duas formas: estrutura-se um framework para identificação e estruturação do problema que consiste no estabelecimento de políticas de manutenção suportadas por modelos matemáticos e propõe-se uma melhoria para um tipo de modelagem amplamente aplicada ao contexto da manutenção industrial.

Palavras-chave: Modelagem em manutenção. Metodologia para modelagem. *Delay time*. Custo em estado defeituoso.

ABSTRACT

Although the development of maintenance models has occurred late in relation to production models, this type of modeling represents a possibility to promote improvement in the operational and strategic aspects of industries, contributing to a better competitive positioning. However, the models developed sometimes do not provide a good representation of reality or are excessively complex, discouraging application in practice. In this context, this thesis proposes the development of a methodology for maintenance modeling that encompasses both the process of identifying and solving the problem, as well as the practical implementation of the solution. The methodology is based on an integration of approaches previously proposed, but applied in different ways. As a result, the methodology is able to point out ways of characterizing the case under study, to direct the mathematical (re)formulation of models and to guide the process of practical implementation. Besides, this thesis proposes some modifications in delay time models for single and multicomponent systems, extending their possibility of application to recurrent contexts in many practical situations. These contexts refer to situations in which the time in defective state interferes in the performance of the component or system, by reducing its efficiency, or interferes in the repair and recycling of the item, for its subsequent reuse. In this sense, the proposed modeling allows a cost related to the sojourn time in a defective state to be inserted in the analyzed delay time models. Finally, the contribution of this work is highlighted in two ways: a process for the development of case studies and formulation of maintenance models is proposed, and an improvement for a type of modeling widely applied to the context of industrial maintenance is suggested.

Keywords: Modelling methodology. Maintenance modelling. Delay time. Cost in defective state.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de Modelagem Matemática 35

Figura 2 - (a) Relação do número de falhas com sua natureza e possibilidade de prevenção. (b) Relação do tempo de inatividade com sua natureza e possibilidade de prevenção. (c) Relação do tempo de inatividade com sua causa e possibilidade de prevenção 37

Figura 3 - Representação de degradação de desempenho por dois estados 39

Figura 4 - Representação do conceito de *delay time* para componente simples 40

Figura 5 - Transformação do defeito em falha e identificação do defeito 40

Figura 6 - Obtenção do *delay time* a partir do reparo de uma falha ou do reparo de um defeito na inspeção 40

Figura 7 - Representação do conceito de *delay time* para sistema multi-componente. 41

Figura 8 - Inspeções imperfeitas em sistema multi-componente 41

Figura 9 - Tempo em estado defeituoso para falha e para identificação do defeito na inspeção 42

Figura 10 - Exemplo de processo de inspeção de um defeito chegando no momento u 44

Figura 11 - *Delay time* para componente simples 46

Figura 12 - *Framework* de metodologia para aplicação do *Delay Time* 47

Figura 13 - *Framework* da metodologia proposta 71

Figura 14 - (a) Válvula globo. (b) Válvula de retenção. (c) Válvula de portão 76

Figura 15 - (a) Válvula de bola. (b) Válvula de borboleta 77

Figura 16 - (a) Bomba centrífuga. (b) Bomba de deslocamento positivo 78

Figura 17 - Estrutura básica de um trilho ferroviário 80

Figura 18 - (a) Representação de um shredder e (b) exemplo de degradação em martelos 83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Elementos contextualizadores, problemas e objetivos 20
Quadro 2 - Estrutura da pesquisa 21
Quadro 3 - Metodologias de modelagem bases para a metodologia proposta 52
Quadro 4 - Metodologia para Modelagem Matemática da Manutenção 52
Quadro 5 - Etapa 1: entendimento do processo 54
Quadro 6 - Etapa 2: abordagem snapshot 56
Quadro 7 - Etapa 3: definição do problema 57
Quadro 8 - Etapa 4: caracterização do sistema 58
Quadro 9 - Etapa 5: seleção de modelo de formulação 59
Quadro 10 - Etapa 6: levantamento de dados 62
Quadro 11 - Etapa 7: (re)formulação matemática 64
Quadro 12 - Etapa 8: estimação de parâmetros 65
Quadro 13 - Etapa 9: análise e validação do modelo 67
Quadro 14 - Etapa 10: solução do problema 69
Quadro 15 - Etapa 11: implementação da solução 70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Representação de C_p (a) para o modelo tradicional e (b) para os modelos propostos 1 e 2 86

Gráfico 2 - Representação de C_f (a) para o modelo tradicional e (b) para o modelo 2..... 87

Gráfico 3 - Custo esperado por unidade de tempo para o modelo 1 considerando diferentes valores de c 89

Gráfico 4 - Custo esperado por unidade de tempo para o modelo 2 considerando diferentes valores de c 89

Gráfico 5 - (a) Modelo delay time tradicional e (b) Modelo 3 com curvas de variação para o valor de C_p 93

Gráfico 6 - Comparação do modelo 3 com o tradicional quando $C_p = 1$ e $\lambda = 1$ 96

Gráfico 7 - Comparação do modelo 3 com o tradicional quando $C_p = 2$ e $\lambda = 0{,}5$ ... 96

Gráfico 8 - Comparação do modelo 3 com o tradicional quando $C_p = 3$ e $\lambda = 0{,}333$ 96

Gráfico 9 - Comparação do modelo 3 com o tradicional quando $C_p = 4$ e $\lambda = 0{,}25$.. 97

Gráfico 10 - Custo esperado para manter o sistema em um regime de inspeções a cada T unidades de tempo 103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Impacto do efeito da inserção do custo em estado defeituoso no modelo *delay time* 88

Tabela 2 - Sensibilidade dos modelos 1 e 2 em relação à variação de C_f e C_i 91

Tabela 3 - Funções de h aplicadas na Equação 3.4 94

Tabela 4 - Comparação entre modelo tradicional e modelo 3 95

Tabela 5 - Sensibilidade do modelo 3 em relação à variação de C_i e C_f 98

Tabela 6 - Impacto do efeito da inserção do custo em estado defeituoso no modelo *delay time* 102

Tabela 7 - Sensibilidade do modelo 4 à variação de C_f 105

Tabela 8 - Sensibilidade do modelo 4 à variação de C_i 106

Tabela 9 - Sensibilidade do modelo 4 à variação de C_r 107

Tabela 10 - Sensibilidade do modelo 4 à variação de k 108

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**15**
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	15
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	OBJETIVOS	18
1.3.1	**Objetivo geral**	**18**
1.3.2	**Objetivos específicos**	**18**
1.4	METODOLOGIA	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	**BASE CONCEITUAL E REVISÃO DA LITERATURA**	**23**
2.1	MANUTENÇÃO	23
2.1.1	**Definição**	**24**
2.1.2	**Classificação**	**25**
2.1.3	**Funções e objetivos**	**26**
2.1.4	**Políticas e concepções básicas**	**28**
2.1.5	**Importância**	**30**
2.2	MODELAGEM EM MANUTENÇÃO	31
2.2.1	**Confiabilidade**	**32**
2.2.2	**Etapas de um processo de modelagem**	**34**
2.2.3	**Abordagem *snapshot***	**36**
2.2.4	**Modelagem *delay time***	**38**
2.2.4.1	*Delay time para planta complexa*	*42*
2.2.4.2	*Delay time para componente simples*	*45*
2.2.4.3	*Contribuições recentes para a modelagem delay time*	*46*
2.2.5	**Do desenvolvimento teórico à abordagem prática**	**49**
2.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO	50
3	**METODOLOGIA PARA MODELAGEM EM MANUTENÇÃO**	**51**
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO CASO EM ESTUDO	53
3.1.1	**Etapa 1: Entendimento do processo**	**53**
3.1.2	**Etapa 2: Abordagem *snapshot***	**55**
3.1.3	**Etapa 3: Definição do problema**	**56**
3.1.4	**Etapa 4: Caracterização do sistema**	**57**

3.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA 59
3.2.1 Etapa 5: Seleção do modelo de formulação 59
3.2.2 Etapa 6: Levantamento de dados 60
3.2.3 Etapa 7: (Re)Formulação matemática 63
3.2.4 Etapa 8: Estimação de parâmetros 64
3.2.5 Etapa 9: Validação e análise do modelo 66
3.3 SOLUÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA 67
3.3.1 Etapa 10: Solução do problema 68
3.3.2 Etapa 11: Implementação da solução 69
3.4 *FRAMEWORK* 70
3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA 72
3.6 *INSIGHT* PARA MODIFICAÇÕES EM MODELOS *DELAY TIME* 73
3.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO 74
4 DELAY TIME: ANÁLISE DO CUSTO EM ESTADO DEFEITUOSO 75
4.1 ESTADO DEFEITUOSO COMO FATOR PREPONDERANTE EM POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO 75
4.1.1 Equipamentos possivelmente modelados por meio dos modelos apresentados 76
4.1.1.1 Válvulas hidráulicas 76
4.1.1.2 Bombas de sucção 78
4.1.1.3 Tubulações 79
4.1.1.4 Trilhos de ferrovias 80
4.1.2 A importância do tempo em estado defeituoso em contextos práticos 81
4.1.2.1 Reuso e reciclagem de itens 81
4.1.2.2 Diminuição da eficiência do sistema 82
4.2 INSERÇÃO DE CUSTO ASSOCIADO AO ESTADO DEFEITUOSO EM MODELOS DELAY TIME 83
4.2.1 Custo em estado defeituoso em modelo *delay time* para componente simples 84
4.2.1.1 Modelo 1: Acréscimo no custo do reparo do defeito em função do tempo em estado defeituoso 85
4.2.1.2 Modelo 2: Acréscimo no custo do reparo do defeito e no custo da falha em função do tempo em estado defeituoso 86

4.2.1.3 Análise dos modelos 1 e 2 88
4.2.1.4 Sensibilidade dos modelos 1 e 2 em relação à variação em C_f e C_i 90
4.2.1.5 Modelo 3: Decréscimo no custo do reparo do defeito em função do tempo em estado defeituoso 92
4.2.1.6 Análise do modelo 3 93
4.2.1.7 Sensibilidade do modelo 3 em relação à variação em C_i e C_f 97
4.2.2 Custo em estado defeituoso em modelo *delay time* para sistemas complexos 99
4.2.2.1 Modelo 4: Inserção do custo relacionado ao período em estado defeituoso para sistema multicomponente 101
4.2.2.2 Análise do modelo 4 101
4.2.2.3 Sensibilidade do modelo 4 em relação à variação em C_i, C_r, C_f e k 104
4.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS MODELAGENS PROPOSTAS... 108
4.4 INTEGRAÇÃO COM A METODOLOGIA PREVIAMENTE DESCRITA.... 109
4.5 IMPLICAÇÕES GERENCIAIS 110
4.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO 110
5 CONCLUSÕES 111
5.1 TRABALHOS FUTUROS 112
REFERÊNCIAS 114
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PARA GESTOR DE MANUTENÇÃO 119
APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO PARA OPERADOR DE MANUTENÇÃO 122

1 INTRODUÇÃO

A manutenção, apesar de já ter sido considerada um mal necessário, representa atualmente uma importante função para o desenvolvimento e competitividade das empresas, sobretudo no segmento industrial (PINTELON; PARODI-HERZ, 2008). Essa mudança de perspectiva ocorreu devido à evolução de sua concepção, ao desenvolvimento de metodologias de planejamento, modelagem e execução que passaram a contribuir para melhor disponibilidade, prontidão, segurança, entre outros fatores que interferem diretamente na produtividade industrial.

Com isso, a manutenção ganhou um enfoque estratégico antes ignorado e atualmente indispensável para indústrias dos mais variados campos de atuação. Nesse contexto, Pinjala, Pintelon e Vereecke (2006) ressaltam que existe uma relação entre estratégia de negócio e estratégia de manutenção, de modo que a manutenção pode ser aplicada de diversas formas possíveis a depender das características e do posicionamento estratégico das empresas.

Dada a importância estratégica da manutenção, sua capacidade de interferir nos resultados operacionais e a vasta forma como pode ser desenvolvida e aplicada, estudos que possibilitem identificar problemas e propor melhorias relacionadas a casos específicos, por meio de uma modelagem da situação real, são cada vez mais relevantes em um cenário de mercado competitivo e disputado.

É nessa conjuntura que esta dissertação tem sua motivação inicial, à qual se relaciona com a possibilidade do desenvolvimento de uma metodologia que permita identificar problemas, caracterizar a situação e possibilitar uma estruturação para o desenvolvimento de modelagens que de fato possam contribuir para a solução de problemas reais, servindo como uma ferramenta para a tomada de decisão na indústria.

Posto isso, este estudo trata do desenvolvimento de um *framework* para o processo de modelagem matemática da manutenção, englobando fatores tanto de ordem objetiva quanto subjetiva, dada a diversidade de elementos a serem analisados e a escassez de dados objetivos, sobretudo nos países em desenvolvimento (SCARF, 1997; DESA; CHRISTER, 2001).

Além disso, esta dissertação sugere modificações em modelos *delay time* para componente simples e para sistema multicomponente, incluindo a possibilidade de melhor tratar o custo relativo ao tempo de permanência em estado defeituoso.

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Apesar de muitos avanços terem ocorrido no campo da manutenção ao longo dos anos, a modelagem matemática da manutenção teve um desenvolvimento tardio em relação aos

modelos de produção. Segundo Scarf (1997), duas razões para este atraso são o fato da manutenção ser aplicada na planta e não no produto e a dificuldade de associar os gastos em manutenção com as melhorias operacionais.

No cenário de países em desenvolvimento, como o Brasil, ainda existe uma escassez de dados objetivos que, aliado com uma cultura de imediatismo e com a existência de falta de planejamento de algumas questões operacionais, sobretudo em empresas de pequeno porte, contribuem para um atraso no desenvolvimento da modelagem em manutenção.

Outro aspecto relacionado com o problema em estudo é o fato dos modelos existentes muitas vezes não se adequarem à situação prática de aplicação, seja por não ser uma boa representação da realidade, ou por exigir um número elevado de parâmetros que torna sua aplicação difícil e não interessante para as empresas (SCARF, 1997). Deste modo, o constante desenvolvimento de novos modelos de manutenção e adequação dos já existentes a casos reais de aplicação apresentam-se como elementos importantes para o desenvolvimento desta área.

Nesse contexto, esta dissertação tem como problema central a definição de um *framework* para modelagem da manutenção e como problema periférico, a apresentação de modificações em modelos *delay time* para componente simples e para sistema multicomponente. Tanto o problema quanto a definição da hipótese da pesquisa são apresentados, de modo mais formal, respectivamente, no tópico metodologia e no final da revisão bibliográfica. Entretanto, é mostrado no parágrafo seguinte o resumo das principais abordagens adotadas no processo de estabelecimento de resolução do problema central da pesquisa.

Pretende-se analisar algumas metodologias e estratégias relacionadas com o processo de modelagem ou com a identificação de fatores importantes para seu desenvolvimento. No que concerne ao passo a passo para o desenvolvimento de um modelo, este estudo baseia-se no processo de modelagem matemática para a solução de problemas reais proposto por Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016). No que se refere à metodologia para a caracterização da situação da manutenção e para a obtenção de dados subjetivos, fundamenta-se na abordagem *snapshot*, proposta inicialmente por Christer e Whitelaw (1983). No que tange à aplicação de modelagens de manutenção em sistemas em que defeitos antecedem as falhas (conceito *delay time*), baseia-se na metodologia proposta por Jones, Jenkinson e Wang (2009).

Assim, almeja-se integrar a potencialidade de metodologias já existentes para desenvolver um *framework* que considere pontos não previamente abordados, quando da aplicação individual destas metodologias já estabelecidas.

Desta forma, este estudo propõe desenvolver uma metodologia e um *framework* para estruturação e desenvolvimento do processo de modelagem da manutenção. Além disso,

modificações em modelos *delay time* são sugeridas, ampliando sua possibilidade de aplicação prática.

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar dos avanços ocorridos na área da manutenção, a modelagem em manutenção ainda apresenta desafios a serem superados, como a melhor adequação dos modelos à realidade e o desenvolvimento de mecanismos que pautem a forma como a modelagem pode ser elaborada, considerando os aspectos relevantes dos casos reais.

Além disso, o desenvolvimento de ações proativas de manutenção, pautadas em modelos condizentes com a realidade, depende de um entendimento consolidado do sistema ao qual a manutenção está sendo aplicada. A proposta desse trabalho, de propor uma metodologia que possibilite o entendimento do contexto ao qual a manutenção é empregada e delineie formas de estruturação da modelagem, pode possibilitar a elaboração de modelos mais efetivos e condizentes com a realidade.

Nesse sentido, Christer e Whitelaw (1983) enfatizam que um controle efetivo da manutenção requer informações que sejam capazes de definir a natureza do problema e não somente sua dimensão. De fato, entender como os problemas são originados, a que aspecto particular eles se relacionam, e o porquê da existência de um ambiente que possibilita suas ocorrências, são fundamentais para que qualquer proposição de melhoria seja indicada e para que a modelagem esteja em consonância com a realidade.

À luz disso, este estudo se justifica pela possibilidade de estruturar um *framework* para o desenvolvimento da modelagem em manutenção que engloba fatores não tradicionalmente considerados no processo de modelagem, como por exemplo, a possibilidade da inclusão de informações subjetivas que permeiam todo o contexto ao qual o sistema em manutenção está inserido.

Além deste, outro aspecto igualmente relevante são as sugestões de melhorias nas modelagens *delay time* para componente simples e para sistemas multicomponente. Essas sugestões, que consideram um custo associado ao período de permanência em estado defeituoso, permitem que os modelos sejam mais condizentes com a realidade em muitas situações existentes na prática, como por exemplo em casos em que há um aumento significativo do custo de renovação em função do tempo em estado defeituoso e também em processos de reciclagem de itens, nos quais o esforço para a reciclagem depende do quão degradado o estado do componente se encontra.

Assim, a primeira contribuição possibilita o desenvolvimento da área de modelagem em manutenção de forma geral, indicando uma estrutura conveniente para o desenvolvimento de modelos matemáticos em manutenção. A segunda, por sua vez, contribui para que modelos tradicionalmente usados na literatura ganhem um novo espaço de aplicação, por meio de considerações antes não apresentadas na literatura.

1.3 OBJETIVOS

Este tópico apresenta os objetivos geral e específicos.

1.3.1 Objetivo geral

Propor uma metodologia que auxilie no desenvolvimento de modelagens em manutenção com maior conformidade aos contextos reais de aplicação, considerando aspectos subjetivos e objetivos, e indicando o passo a passo adequado para o processo de modelagem.

1.3.2 Objetivos específicos

De modo mais específico, este estudo contribui para uma melhor abordagem ao problema de estabelecimento de políticas de manutenção por meio do desenvolvimento de uma metodologia própria de modelagem. Ele também descreve sobre modificações nos modelos *delay time* para componente simples e para sistemas multicomponente, ampliando a aplicação desses modelos na prática. Assim, os objetivos específicos são:

- Desenvolver uma metodologia para modelagem em manutenção;
- Propor um *framework* para modelagem da manutenção;
- Sugerir modificações na modelagem *delay time* para componente simples, inserindo a possibilidade de contabilização do custo relativo ao tempo em estado defeituoso.
- Sugerir modificação na modelagem *delay time* para sistema multicomponente, inserindo a possibilidade de contabilização do custo relativo ao tempo em estado defeituoso.

1.4 METODOLOGIA

Este tópico aborda a metodologia utilizada neste estudo. Primeiro, apresenta-se formalmente o problema, depois determina-se a caracterização do estudo quanto à abordagem, à natureza, aos objetivos, e aos procedimentos.

Segundo Markoni e Lakatos (2003), o problema de pesquisa é a dificuldade no conhecimento de algo importante, para o qual se deve encontrar uma solução. Ele possibilita

definir e identificar o assunto em estudo, de modo que todo o desenvolvimento da pesquisa é pautado para que ele seja satisfatoriamente respondido. Para iniciar a possibilidade de responder a um problema de pesquisa de forma válida, define-se uma hipótese inicial, uma suposição que propõe explicações para certos fatos e guia a busca por informações relevantes para a solução do problema analisado (MARKONI; LAKATOS, 2003).

Posto isso, é essencialmente importante a definição e caracterização do problema a ser estudado, bem como da hipótese que norteia o desenvolvimento do estudo em busca de uma solução válida e satisfatória. Nesse sentido, o problema de pesquisa é apresentado a seguir.

Problema: como o desenvolvimento de uma metodologia pode auxiliar no problema da modelagem em manutenção, de modo que ela seja melhor aplicada em situações reais e que a identificação do problema, a caracterização do sistema e os aspectos subjetivos e objetivos relacionados ao caso específico sejam efetivamente considerados?

A hipótese para a resolução do problema é devidamente apresentada após a revisão da literatura. De modo geral, acredita-se que a integração de metodologias que tratam aspectos distintos da manutenção pode contribuir para o desenvolvimento de uma ferramenta base para elaboração de modelos matemáticos.

No que concerne à abordagem da pesquisa, este estudo pode ser caracterizado como qualitativo e quantitativo, pois analisa tanto elementos que não necessariamente estão associados à representatividade numérica de dados, como também tem enfoque quantitativo, no que se refere à proposta de inserção do custo em estado defeituoso em modelagens *delay time*. É qualitativo porque se preocupa com aspectos que não podem ser quantificados, mas que são necessários para explicar o porquê das coisas por meio do aprofundamento da compreensão da estruturação da modelagem de acordo com a realidade (GERHARDT; SILVEIRA, 2009). É quantitativo porque parte dos resultados da pesquisa, referente à modelagem matemática, pode ser quantificado para descrever alguma característica particular.

Quanto à natureza, é uma pesquisa aplicada posto que objetiva a geração do conhecimento com enfoque prático e é dirigido à solução de problemas específicos (GERHARDT; SILVEIRA, 2009). Quanto aos objetivos, apesar de conter elementos exploratórios, a pesquisa é essencialmente descritiva, pois descreve o passo a passo da proposição de uma metodologia, e também é explicativa pois também consiste na identificação dos fatores que contribuem para a ocorrência de determinados fenômenos, aprofundando o conhecimento da realidade e explicando o porquê e a razão dos fatos analisados (GIL, 2002).

Quanto aos procedimentos, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica para maior esclarecimento sobre o tema estudado e embasamento da metodologia proposta. Esta

revisão foi pautada em livros de autores importantes na área de manutenção, para o embasamento dos conceitos já consolidados na literatura, e também em artigos científicos para a identificação e análise do estado da arte no que concerne à metodologia e modelagem em manutenção. Além disso, foram realizados o desenvolvimento de um *framework* para ser aplicado no contexto da modelagem em manutenção e proposições de melhoria em modelos *delay time*, para melhor representação da realidade em alguns casos específicos.

O Quadro 1 contextualiza o problema da pesquisa com os seus objetivos geral e específicos, bem como estabelece uma relação com os principais conceitos-chave.

Quadro 1 – Elementos contextualizadores, problemas e objetivos

Elementos contextualizadores	**Problemas**	**Objetivo geral**	**Objetivos Específicos**	**Conceitos chaves**
Manutenção industrial Modelagem matemática da manutenção Metodologias para identificação de problemas e caracterização da situação atual	**Central:** Como o desenvolvimento de uma metodologia pode auxiliar no problema da modelagem em manutenção, de modo que ela seja melhor aplicada em situações reais e que a identificação do problema, a caracterização do sistema e os aspectos subjetivos e objetivos relacionados ao caso específico sejam efetivamente considerados? **Periférico:** Como a inserção do custo em estado defeituoso pode contribuir para a melhor adequação de modelos *delay time* a situações práticas?	Propor uma metodologia que auxilie no desenvolvimento de modelagens em manutenção com maior conformidade aos contextos reais de aplicação, considerando aspectos subjetivos e objetivos, e indicando o passo a passo adequado para o processo de modelagem.	Desenvolver uma metodologia para modelagem em manutenção.	Desenvolvimento metodológico
			Propor um *framework* para modelagem da manutenção.	Estruturação metodológica
			Sugerir modificações na modelagem *delay time* para componente simples, inserindo a possibilidade de contabilização do custo relativo ao tempo em estado defeituoso	Desenvolvimento de modelos Manutenção preventiva Inspeção *Delay time* Custo em estado defeituoso Componente simples Sistema multicomponente
			Sugerir modificação na modelagem *delay time* para sistema multicomponente, inserindo a possibilidade de contabilização do custo relativo ao tempo em estado defeituoso.	

Fonte: O autor (2019)

Por fim, o Quadro 2 sintetiza a estruturação metodológica desta dissertação, indicando suas etapas e respectivos métodos de pesquisa.

Quadro 2 – Estrutura da pesquisa

Conhecimento prévio		**Formulação de metodologia e modelos**		**Estruturação da metodologia e análise dos modelos propostos**	
Etapa 1 Revisão da literatura	**Etapa 2** Metodologias e modelos existentes	**Etapa 3** Proposição de metodologia	**Etapa 4** Proposição de modelos matemáticos	**Etapa 5** Estruturação da metodologia	**Etapa 6** Análise dos modelos
OBJETIVO: Identificar e compreender conceitos, metodologias e modelagens associadas a manutenção industrial.	OBJETIVO: Identificar metodologias e modelos para identificação de problemas e proposição de melhorias em manutenção industrial.	OBJETIVO: Propor uma metodologia para a modelagem da manutenção, indicando e explicando seu passo a passo.	OBJETIVO: Propor melhorias em modelos de manutenção, aumentando sua possibilidade de aplicação prática.	OBJETIVO: Estruturar framework para facilitação de uma futura aplicação prática em contextos reais.	OBJETIVO: Analisar, de modo comparativo, os resultados dos modelos propostos, verificando suas vantagens em relação a modelagem pré-estabelecida na literatura.
Método de Pesquisa Revisão da literatura (varredura horizontal)	**Método de Pesquisa** Revisão da literatura (varredura horizontal)	**Método de Pesquisa** Revisão sistemática da literatura (varredura vertical)	**Método de Pesquisa** Revisão sistemática da literatura (varredura vertical)	**Método de Pesquisa** Estruturação metodológica da metodologia proposta	**Método de Pesquisa** Estudo comparativo

Fonte: O autor (2019)

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação é dividida em cinco capítulos: Introdução, Base Conceitual e Revisão da Literatura, Metodologia para Modelagem em Manutenção, *Delay time*: Análise do Custo em Estado Defeituoso, e Conclusões.

A Introdução apresenta a contextualização do desenvolvimento do trabalho e é estruturada de forma a descrever o problema, apresentar a justificativa, definir os objetivos (geral e específicos) e apresentar a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa.

O segundo capítulo, Base Conceitual e Revisão da Literatura, aborda inicialmente a manutenção sob uma perspectiva mais geral e, posteriormente, trata do aspecto da modelagem em manutenção, enfatizando as etapas do processo de modelagem e apresentando a abordagem *snapshot* e a modelagem *delay time*, bases para o desenvolvimento deste trabalho.

O terceiro capítulo, Metodologia para Modelagem em Manutenção, apresenta uma metodologia e um *framework* para auxiliar no processo de modelagem da manutenção de forma mais condizente com a realidade.

O quarto capítulo, *Delay Time*: Análise do Custo em Estado Defeituoso, sugere modificações em modelos *delay time* para componente simples e para sistema multicomponente.

O quinto e último capítulo apresenta as considerações finais sobre o trabalho, indica suas potencialidades e limitações, e sugere alguns pontos para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 BASE CONCEITUAL E REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a base conceitual e a revisão de literatura. Inicialmente, aborda-se a conceituação, a importância e outros aspectos relacionados com a manutenção de forma geral e, em seguida, trata-se de forma mais específica sobre modelagem em manutenção.

2.1 MANUTENÇÃO

Historicamente, a manutenção evoluiu de um contexto no qual era considerada uma parte inevitável da produção ou um "mal necessário" (década de 1940) para uma função complexa, englobando habilidades técnicas e de gerenciamento (por volta do ano 2000). Atualmente, a função manutenção é parte fundamental no desenvolvimento de estratégias de negócios, possivelmente no mesmo nível da função produção (PINTELON; PARODI-HERZ, 2008).

Apesar disso, o conceito de manutenção às vezes é entendido de forma errada tanto em nível gerencial como operacional. Devido a muitos equívocos em seu entendimento conceitual, muitas vezes ela ainda é vista de forma negativa (MOBLEY, 2002). Em decorrência disso, a manutenção passa a ser negligenciada em empresas que não desenvolvem uma política de manutenção adequada para os seus sistemas produtivos, descuidando-se de um fator que poderia contribuir consideravelmente para a melhoria no desempenho operacional.

Mobley (2002) também ressalta que a manutenção não é simplesmente uma verificação preventiva, uma lubrificação ou uma corrida frenética para reparar um componente de uma máquina quando ela falha. A manutenção apesar de incluir ou se relacionar com as situações supracitadas, vai muito além delas e pode contribuir para o bom funcionamento das operações industriais, desde que planejada e executada de forma a atender às particularidades de cada sistema produtivo.

Evidencia-se a necessidade de um entendimento claro a respeito desse conceito, de modo que ele não seja visto apenas como uma ação corretiva ou uma ação que vise evitar defeitos e falhas nos componentes, máquinas e sistemas em operação. Nesse sentido, é importante compreender a manutenção de forma a verificar suas dimensões e potencialidades de aplicação e melhoria nos sistemas produtivos. Para tanto, a definição de manutenção é apresentada na próxima seção e suas classificações, funções, objetivos, políticas, concepções e importância são abordados em seguida.

2.1.1 Definição

Slack, Chambers e Johnston (2002) definem a manutenção apenas como a forma pela qual as empresas tentam evitar que falhas aconteçam em suas instalações físicas. Essa definição, que delimita a manutenção ao aspecto preventivo, corrobora com a ideia de que muitas vezes esse conceito não é entendido em sua abrangência e potencialidade.

Diferentemente, Mobley (2002) define a manutenção de forma mais ampla e englobando diversos aspectos, o que também dificulta o entendimento claro do conceito, como pode-se observar na definição deste autor, apresentada em seguida.

Segundo Mobley (2002) a manutenção é além de uma ciência, uma arte e uma filosofia. Ela é uma ciência porque sua execução depende de outras ciências; é uma arte porque diferentes problemas demandam e podem receber diferentes tipos de abordagens; e sobretudo é uma filosofia porque é uma disciplina que pode ser aplicada de forma intensamente racional, dependendo de uma vasta gama de variáveis que muitas vezes requerem análises não imediatas e soluções não óbvias.

De modo mais sucinto, a manutenção pode ser vista como todas as atividades executadas em equipamentos e sistemas de controle com o intuito de avaliar, manter e restaurar a capacidade operacional de um sistema (ZWINGELSTEIN, 2003).

De forma geral, a manutenção é definida como uma ação que visa evitar que uma falha aconteça em um determinado sistema, ou caso tenha ocorrido, é a ação que repara a falha, possibilitando que o sistema retorne à operação (O'CONNOR, KLEYNER, 2012). De fato, Carter (1986) menciona que a maioria das atividades de manutenção envolve a substituição de um equipamento que falhou ou está próximo de falhar, por um novo, ou seja, a atividade de manutenção tem por finalidade básica evitar ou corrigir falhas nos sistemas.

Finalizando a conceituação, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT define a manutenção na norma NBR 5462/1994 como: "a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou realocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida" (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, p. 6). Essa definição é globalmente aceita, sendo similar à apresentada na norma Europeia de terminologias relacionadas à manutenção, EN 13306:2010 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2010).

A manutenção é, portanto, um conjunto de atividades técnicas e administrativas, que permite a elaboração de uma política adequada à realidade das empresas e complexos industriais a qual é baseada em uma ciência de estudo de dados operacionais e de falha, e tem por objetivo evitar que os sistemas produtivos (ou atividades de serviço) fiquem indisponíveis

por conta de uma falha em algum equipamento, ou caso a falha já tenha ocorrido, a manutenção objetiva a sua correção de modo a causar menores transtornos no processo produtivo (ou operação), fazendo com que os itens que o compõe desempenhem corretamente suas respectivas funções requeridas.

2.1.2 Classificação

A manutenção pode ser classificada em três abordagens básicas, as quais são amplamente difundidas na literatura científica e normativa. Essas abordagens são: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

- **Manutenção corretiva**: é realizada depois que alguma pane ocorre e tem a finalidade de recolocar o item em funcionamento, possibilitando que ele volte a executar sua função requerida (CARTER, 1986; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994). Nessa abordagem, as instalações continuam a operar até falharem e o trabalho de manutenção somente é realizado depois da falha ter ocorrido (SLACK, CHAMBERS, JOHNSTON, 2002). Uma forma de se quantificar e estudar esse tipo de manutenção é através do tempo médio de reparo (*Mean Time To Repair – MTTR*) (O'CONNOR, KLEYNER, 2012).
- **Manutenção preventiva**: Manutenção preventiva: é realizada com o intuito de manter um equipamento em uma condição operacional satisfatória, através da substituição sistemática de componentes antes que eles falhem ou por meio de algumas atividades de inspeção (CARTER, 1986). Apesar da norma NBR 5462/1994 defini-la como a que é efetuada em intervalos de tempos pré-determinados ou de acordo com algum outro critério prescrito, a manutenção preventiva deve ser considerada apenas como a ação que é realizada com base unicamente no tempo de operação do item. Este entendimento descrito na norma acontece devido ao fato da manutenção preventiva e a manutenção preditiva derivarem do mesmo termo em inglês: *Preventive Maintenance – PM*, tendo-se, portanto, dois tipos de PM, que são: *Time-Directed PM* e *Condition-Directed PM* (ZWINGELSTEIN, 2003). Por isso, em português, pode-se encontrar a manutenção preditiva como parte da manutenção preventiva. Nesse caso, a manutenção preventiva é dividida em dois subtipos: sistemática, para a preventiva (baseada no tempo de operação), e baseada em condições, para a preditiva (MIRANDA; SILVA, 2001). A manutenção preventiva pode ser medida em termos do tempo utilizado para executar alguma ação de manutenção e suas respectivas frequências ao longo do tempo (O'CONNOR, KLEYNER, 2012). Alguns exemplos de atividades de manutenção preventiva são: limpeza, lubrificação, verificação e substituição (SLACK,

CHAMBERS, JOHNSTON, 2002). Além disso, dentro da manutenção preventiva, existem duas classes distintas de ações de manutenção: as que são realizadas com o intuito de se fazer um rejuvenescimento do item (ou eliminar os modos de falhas provenientes da degradação do dispositivo) e as que são realizadas com o intuito de permitir que o sistema volte a operar dentro das condições previstas em projeto.

- **Manutenção preditiva**: baseia-se na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de formas de supervisão centralizadas ou de amostragem com o intuito de reduzir a necessidade de manutenções preventivas e corretivas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994). Esse tipo visa que a ação de manutenção ocorra somente quando as instalações realmente precisarem dela, ou seja, quando a possibilidade de falha é iminente, por isso o constante monitoramento do estado (CARTER, 1986; SLACK, CHAMBERS, JOHNSTON, 2002). Assim, a principal finalidade deste tipo de manutenção é identificar o estado do sistema, quando possível, por meio da observação de parâmetros provenientes do próprio funcionamento do dispositivo, podendo-se constatar estados alterados de operação ou falhas iminentes.

Afora essas considerações que tratam de minúcias conceituais referente às manutenções planejadas (preventivas e preditivas) e corretiva, é importante mencionar que a maior parte das operações produtivas utilizam uma combinação entre abordagens devido ao fato que diferentes elementos de uma instalação possuem características distintas (SLACK, CHAMBERS, JOHNSTON, 2002).

Além disso, mesmo quando uma das abordagens é definida, pode-se utilizar diferentes políticas de forma a adequar a atividade de manutenção às necessidades particulares de cada sistema produtivo. Algumas políticas e concepções serão apresentadas de forma introdutória em tópico posterior, após a apresentação das funções da manutenção e dos seus objetivos, os quais são apresentados no próximo tópico.

2.1.3 Funções e objetivos

No que se refere às funções da manutenção, pode-se dividi-las em dois grupos principais, as funções primárias, as quais requerem um trabalho diário do departamento de manutenção, relacionando-se diretamente a ele; e as funções secundárias, as quais são atribuídas ao departamento de manutenção por conveniência, *know-how*, ou devido a algum outro motivo (MOBLEY, 2002).

Segundo Mobley (2002) as funções primárias são:

- **Manutenção dos equipamentos existentes na planta industrial**: consiste em fazer os reparos nas máquinas de forma rápida e econômica e sempre que possível antecipar esses reparos, utilizando uma manutenção preventiva.
- **Manutenção dos edifícios e terrenos existentes na planta industrial:** executar a manutenção de todos os edifícios e também das áreas externas vinculadas à planta, desde o sistema de esgoto a instalações de abastecimento de água, entre outras.
- **Inspeção e lubrificação de equipamentos:** com o intuito de visualizar a condição e retardar o processo de deterioração dos equipamentos da planta.
- **Geração e distribuição de serviços de utilidade:** trata da gestão dos serviços utilitários à planta industrial, como geração e/ou distribuição de energia elétrica, água, gás, etc.
- **Alterações e novas instalações:** a forma como essa função é executada depende de alguns fatores, dentre os quais se destacam o tamanho da planta e a política da empresa. Empresas pequenas tendem a gerenciar as mudanças relacionadas ao departamento de manutenção dentro do próprio departamento, enquanto empresas maiores tendem a contratar outras empresas para lidar com a possibilidade de mudanças e/ou o acréscimo de novas instalações.

As funções secundárias, por sua vez, são identificadas por Mobley (2002) como: armazenagem, proteção da instalação, eliminação de resíduos, recuperação de produtos degradados (que necessitem auxílio de máquinas), e administração de seguros.

De forma geral, percebe-se que as funções da manutenção, descritas por Mobley (2002), são estabelecidas de modo que o sistema no qual as funções são exercidas funcione corretamente tanto pela disponibilidade e eficiência dos equipamentos, como pelo favorecimento de um ambiente ou instalação favorável à execução da operação industrial.

Pautando-se nas características dessas funções e também de acordo com Cavalcante (2005), os objetivos principais e comuns da manutenção podem ser estabelecidos como:

- Estender a vida útil dos equipamentos;
- Assegurar nível de disponibilidade satisfatório para o sistema;
- Assegurar prontidão operacional dos equipamentos e;
- Prover segurança para as pessoas que utilizam a instalação.

Ressalta-se que esses objetivos são os principais e comuns, podendo-se ter uma ampla variedade de objetivos de acordo com a perspectiva na qual a manutenção é abordada. Entretanto, nota-se que outros objetivos, direta ou indiretamente, também contribuem em muitos casos para que os objetivos supracitados sejam alcançados, e nos casos em que não existe uma contribuição, geralmente os objetivos acima citados não são negligenciados.

À título de ilustração, a engenharia de manutenção, a qual se relaciona diretamente com o escopo desse trabalho, tem entre seus objetivos: reduzir a quantidade e a frequência da manutenção, melhorar as operações de manutenção, reduzir a quantidade de suprimentos de suporte, estabelecer uma frequência ótima de manutenções preventivas e melhorar a organização da manutenção (US ARMY MATERIAL COMMAND PAMPHLET, 1975).

O entendimento dos objetivos principais e comuns é importante para o desenvolvimento de políticas de manutenção nos mais variados contextos em que a manutenção possa atuar. Além disso, as particularidades de cada sistema também devem ser levadas em consideração na elaboração e/ou aplicação de uma determinada política de manutenção. O próximo tópico trata da classificação das políticas e das concepções básicas da manutenção, mostra como as políticas e concepções retratam os objetivos do sistema e também como elas podem servir como um ponto de partida para o desenvolvimento de modelagens.

2.1.4 Políticas e concepções básicas

Segundo Pintelon e Parodi-Herz (2008), uma política de manutenção é uma regra ou um conjunto de regras que descrevem o mecanismo de atuação para diferentes ações de manutenção. Uma classificação genérica mencionada por esses autores categoriza as políticas em: baseadas em falhas (*failure-based maintenance*), em tempo de utilização (*time/used-based maintenance*), na condição (*condition-based maintenance*), em oportunidade (*opportunity-based maintenance*), ou em projeto (*design-out maintenance*).

Além dessa classificação mais geral, as políticas de manutenção podem ser classificadas de outras formas, por exemplo, modelos probabilísticos e determinísticos, modelos de preparação ou prontidão e sistemas de componentes únicos ou de múltiplos componentes. (CAVALCANTE, 2005).

Essa categorização ampla, apesar de muitas vezes se tornar confusa, é importante para o entendimento de como a manutenção está sendo realizada dentro de um determinado contexto particular. O conhecimento dos tipos de políticas utilizadas em um determinado sistema de produção já estabelece um ponto de partida para o desenvolvimento de modelos de manutenção.

Outra categorização que pode auxiliar nesse sentido é a concepção de manutenção (*maintenance concept*), a qual constitui um conjunto de vários tipos de políticas e ações de manutenção relacionadas a uma estrutura de decisão e suporte (PINTELON; PARODI-HERZ, 2008). De acordo com esses autores as concepções de manutenção são:

- ***Ad hoc***: baseada na análise e decisão de algum especialista no tema.

- ***Quick and Dirty (Q&D)***: utilizam diagramas de decisão para selecionar políticas de manutenção. Apesar de não conseguir conceber conceitos de manutenção mais sofisticados, ainda é amplamente utilizada na prática em algumas situações específicas devido a sua simplicidade (PINTELON; PARODI-HERZ, 2008).
- **Abordagem do custo do ciclo de vida:** metodologia que visa calcular ou estimar o custo total do sistema durante todo o curso de sua vida. Assim, ao se analisar alternativas de manutenção, verifica-se o impacto do custo ao longo de toda a vida útil do sistema. (PINTELON; PARODI-HERZ, 2008).
- **Manutenção Produtiva Total – TPM**: mais do que uma concepção, a TPM é considerada uma filosofia de manutenção. Essa filosofia consolidou-se como uma abordagem que envolve a participação total dos funcionários em todos os níveis da organização. A TPM visa maximizar a eficácia do equipamento, melhorando seu desempenho e produtividade; eliminar a variabilidade causada devido à existência de falhas nos processos de produção; e estabelecer um sistema completo de manutenção preventiva, o qual pode ser integrado à Gestão da Qualidade Total – TQM e a abordagem *Just in Time* – JIT (MENEZES; ALMEIDA, 2001; SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2002; PINTELON; PARODI-HERZ, 2008). Segundo Menezes e Almeida (2001), os pontos-chave dessa abordagem são: criar uma cultura direcionada à máxima eficiência em todo o processo; estar presente em todas as áreas da empresa; desenvolver um sistema que permita a detecção e prevenção de perdas produtivas; incentivar que pequenos grupos de trabalho proponham soluções para problemas relacionados ao ambiente de trabalho e; reforçar as atribuições de manutenção também ao pessoal da produção, os quais estão diretamente envolvidos com a operação e podem funcionar como “sensores humanos”, detectando possíveis anormalidades no sistema.
- **Manutenção Centrada em Confiabilidade – RCM**: como o próprio nome afirma, a RCM é uma concepção de manutenção centrada na confiabilidade. Ela é definida como um processo de determinação dos requisitos de manutenção de qualquer bem físico em operação (MOBRAY, 1997). A RCM leva em consideração a funcionalidade do sistema e não apenas o próprio equipamento. Em sua aplicação, além de se proporcionar uma manutenção mais eficiente e eficaz, pode-se aumentar a vida útil do ativo. A sua abordagem considera, entre outros fatores, a exploração de conhecimento especializado, melhores dados históricos e redução do erro humano (PINTELON; PARODI-HERZ, 2008). Seus objetivos são identificar componentes cujas falhas e degradação impliquem em perdas e/ou ineficiências nas funções importantes de um sistema industrial ou que causem despesas de manutenção

consideráveis (ZWINGELSTEIN, 2003). Para tanto, seu processo de aplicação consiste em identificar as funções principais, as falhas funcionais, os modos, os efeitos e as consequências das falhas, para poder traçar uma estratégia de combate a cada modo de falha (SIQUEIRA; ALMEIDA, 2001). Como benefícios dessa abordagem, pode-se destacar: redução de custo de manutenção direta; disponibilidade no processo e melhoria na eficiência; e otimização de recursos e organização do processo (ZWINGELSTEIN, 2003).

- **Customizada**: pode estabelecer uma combinação entre as concepções da manutenção, de acordo com as particularidades da empresa (PINTELON; PARODI-HERZ, 2008).

Nota-se que as políticas e concepções de manutenção são fundamentais para o estabelecimento de uma organização e direção das atividades de manutenção. Cada uma delas, com sua forma particular de atuação, contribui para que as funções da atividade de manutenção sejam implementadas e para que os objetivos de manutenção sejam alcançados de forma organizada, estruturada e direcionada.

Além disso, as políticas e concepções, quando devidamente estabelecidas e seguidas, são a base para toda a implementação das ações de manutenção em uma determinada empresa ou complexo industrial, elas proporcionam que a função manutenção, assim como a função produção, possa contribuir de forma estratégica para a empresa.

Posto isso, a modelagem em manutenção deve, entre outros fatores, avaliar o emprego e o resultado das políticas e/ou concepções adotadas para que, desse modo, possa-se verificar o impacto e influência delas no sistema, bem como elas podem ser melhor aplicadas ou mesmo associadas a outras formas de abordagens para que o sistema como um todo tenha um melhor resultado em termos de produtividade, disponibilidade, segurança, operacionalidade e vida útil. De fato, a modelagem da manutenção pode possibilitar a determinação de uma política específica para um determinado componente, equipamento ou sistema, por isso a importância dela estar em consonância com as políticas, abordagens e concepções gerenciais.

2.1.5 Importância

Conforme exposto ao longo dessa seção, a manutenção tem papel fundamental no contexto dos sistemas produtivos de modo que não é possível vislumbrar uma operação industrial funcionando sem meios de se monitorar, prevenir ou corrigir defeitos e falhas no sistema. Essa contribuição operacional proporciona resultados que favorecem um melhor posicionamento competitivo empresarial. Nesse sentido, a importância da manutenção pode ser verificada em termos operacionais e estratégicos.

No que concerne à relevância da manutenção no âmbito operacional, ela possibilita que o sistema esteja prontamente disponível para executar suas operações de forma segura e adequada. Considerando-se, por exemplo, que os seus objetivos principais e comuns sejam alcançados, um maior nível de disponibilidade garante que o sistema esteja preparado para atender, dentro de sua capacidade, as demandas exigidas pelo mercado; a prontidão operacional fornece a garantia que o sistema esteja pronto para executar as atividades requeridas; a maior vida útil dos equipamentos permite que os ativos estejam disponíveis por mais tempo, evitando custos desnecessários de aquisição de novos ativos; e a maior segurança para os operadores possibilita um ambiente de trabalho mais salubre e produtivo.

Do ponto de vista estratégico, autores como Pintelon e Parodi-Herz (2008) e Al-Najjar (2012) ressaltam, respectivamente, que a manutenção tem se tornado cada vez mais estrategicamente importante e que a eficácia interna e a melhoria da competitividade podem ser desenvolvidas a partir de melhores práticas de manutenção. De fato, a evolução da manutenção ao longo dos anos permitiu que diversas políticas e abordagens mais avançadas pudessem contribuir com as empresas de forma estratégica, à medida em que o desenvolvimento de um processo mais eficiente e menos custoso as tornam mais competitivas no mercado. Nesse sentido, a manutenção pode contribuir para a conservação de um alto desempenho operacional e a redução significativa de custos, elevando a competitividade da empresa.

Em face da relevância da manutenção no atual contexto empresarial e visto que a análise e o desenvolvimento da modelagem de políticas de manutenção pode contribuir significativamente para um bom desempenho operacional, redução de custos e elevação da competitividade, o estudo sobre formas de desenvolvimento de modelos torna-se importante para que os modelos estejam em consonância com a realidade prática em que serão aplicados. À luz disso, a próxima seção versa sobre modelagem em manutenção, traz uma conceituação básica sobre o tema e trata de formas de abordagem e modelagem essenciais para o desenvolvimento desta dissertação.

2.2 MODELAGEM EM MANUTENÇÃO

A modelagem da manutenção é uma forma de melhor entender o comportamento de um sistema, equipamento ou componente, esclarecer sobre aspectos que são essenciais para o bom funcionamento do sistema e propor uma solução apropriada para determinado problema específico (SANTOS, CAVALCANTE, 2018a).

Apesar disso, os modelos de manutenção tiveram um desenvolvimento mais tardio em relação aos modelos de produção devido ao fato das ações de manutenção serem aplicadas na

planta e não nos produtos e também por conta da dificuldade de associar os gastos em manutenção com as melhorias operacionais (SCARF, 1997).

Com o desenvolvimento de novos sistemas de produção e à medida em que novas tecnologias de manufatura foram sendo criadas, a importância de um sistema confiável que proporcionasse meios de se produzir com qualidade aumentou consideravelmente (NAKAGAWA, 2005). Com isso, surgiu a necessidade de uma manutenção mais efetiva que proporcionasse menores interrupções no processo de produção devido a falhas ou outras influências negativas.

Dessa forma, o aspecto da confiabilidade dos sistemas passou a ser considerado como elemento essencialmente relevante para as operações industriais e, consequentemente, modelos que possibilitassem menores quantidades de falhas no processo passaram a ser amplamente estudados e colocados em prática nos mais variados contextos.

Dada a relevância da modelagem em manutenção, a presente seção trata sobre alguns pontos fundamentais que são relacionados com essa temática. Inicialmente, aborda-se conceitos introdutórios referentes à falha e à confiabilidade do sistema. Em seguida, apresenta-se uma abordagem para o desenvolvimento de um modelo de manutenção. Por fim, aborda-se dois tipos distintos de abordagem e modelagem da manutenção que servirão como base para o desenvolvimento deste estudo: *snapshot e delay-time*.

2.2.1 Confiabilidade

A confiabilidade está relacionada com a quantidade de tempo em que um item (sistema, máquina, componente) consegue funcionar sem que ocorra uma falha (evento que impossibilita a execução da função requerida). Ela é formalmente definida como a probabilidade de uma unidade executar sua função requerida sob condições estabelecidas por um determindado período de tempo (ALMEIDA; FERREIRA; CAVALCANTE, 2001; LEEMIS, 1995; NAKAGAWA, 2005).

Matematicamente, a confiabilidade pode ser descrita da seguinte forma. Considerando que T é uma variável aleatória que define o tempo de vida de um componente com uma função distribuição $F(T)$. Se $F(T)$ é uma função diferenciável, então a função densidade de probabilidade de T é dada por (BEN-DAYA, 2009):

$$f(\mathrm{t}) = \frac{dF(T)}{dt} \tag{2.1}$$

A função confiabilidade $R(t)$ é:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - P(T \leq t) = 1 - F(t) \tag{2.2}$$

Considerando que $F(\mathrm{t}) = \int_0^t f(u)du$, a função confiabilidade $R(t)$ é:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(u)du \tag{2.3}$$

A confiabilidade de um item, em um determinado instante de tempo específico, pode ser melhorada com a adoção de algumas políticas de manutenção, por exemplo, políticas de manutenção preventiva que atuam no item antes que ele venha a falhar, postergando, desta forma, a ocorrência da falha e reestabelecendo níveis mais altos de confiabilidade, ao substituir componente com elevado nível de degradação e, consequentemente, baixo nível de confiabilidade.

No entanto, a realização de tarefas de manutenção em uma sequência elevada e desnecessária pode não ser interessante, além de poder promover a ocorrência de erros decorrentes de problemas na instalação ou procedimentos inadequadamente realizados. Tais erros resultam em uma confiabilidade mais baixa, ao invés de contribuir para o reestabelecimento de uma patamar mais alto de confiabilidade. Assim, um dos principais problemas abordados na modelagem de manutenção é a determinação de quando e como realizar as atividades de manutenção, antes que a falha ocorra. Por isso, a modelagem de políticas de manutenção geralmente se relaciona com a definição da frequência e do tempo em que uma determinada atividade de manutenção deve ser realizada (NAKAGAWA, 2005).

Assim sendo, a modelagem de políticas de manutenção relaciona-se diretamente com a confiabilidade de um determinado sistema, pois visa estabelecer formas de evitar a ocorrência de falhas, as quais promovem variados tipos de inconvenientes, tais como elevação de custos, diminuição da disponibilidade, etc.

Como os modelos apresentam-se sempre como uma representação da realidade e não necessariamente a realidade prática, é importante que o processo de modelagem siga metodologias de orientação que considerem aspectos que garantam uma boa definição do modelo e que, além disso, possibilite uma noção clara de quão perto o modelo se aproxima da realidade. Nesse sentido, a próxima seção aborda como o processo de modelagem pode ser realizado.

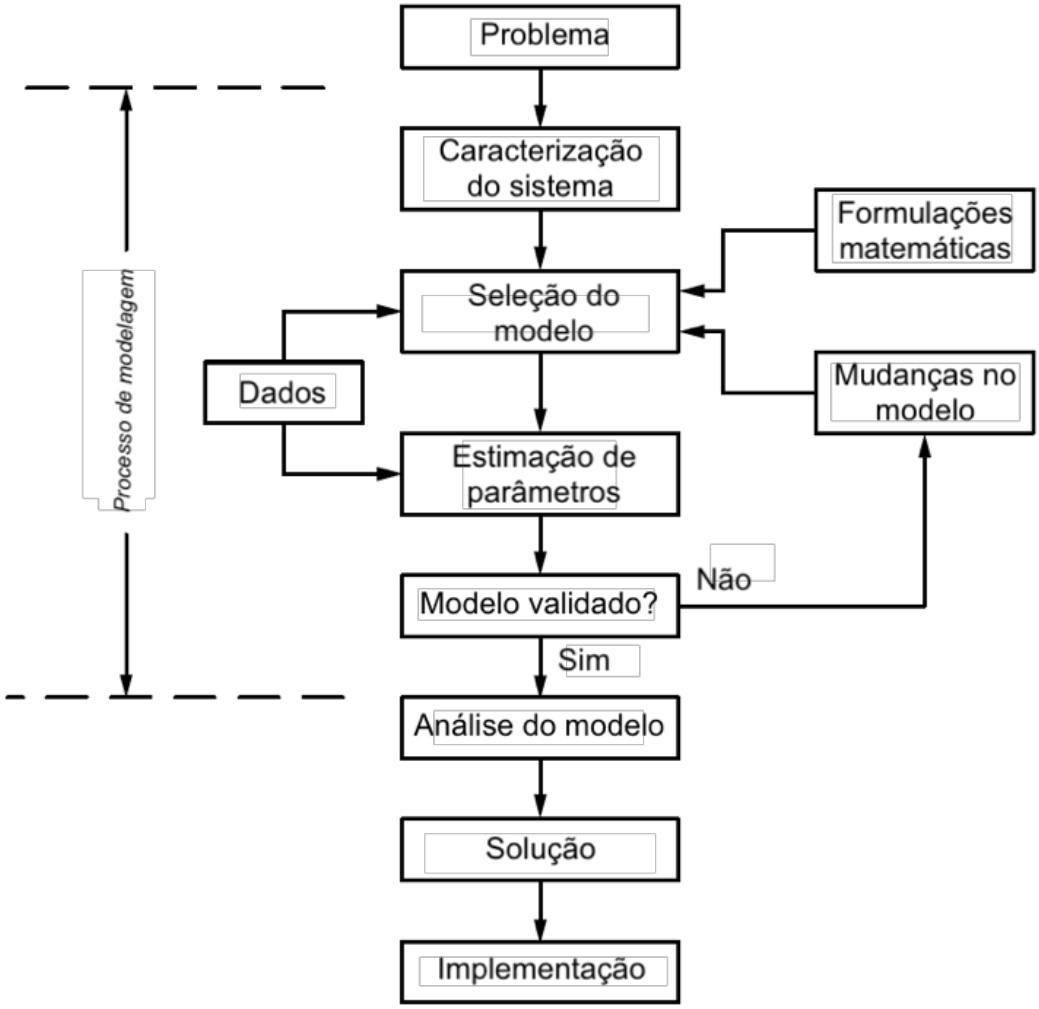
2.2.2 Etapas de um processo de modelagem

Segundo Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016), o processo de modelagem matemática para a resolução de problemas reais envolve várias etapas que podem ser descritas em oito passos distintos.

- **Passo 1 – Definição do problema**: o entendimento correto do problema é essencial para a formulação da modelagem e para a interpretação dos resultados.
- **Passo 2 – Caracterização do sistema**: deve detalhar as principais características do sistema que são relevantes para o problema em consideração. É comum que ocorram simplificações, as quais devem estar bem estabelecidas nas suposições referentes ao modelo.
- **Passo 3 – Seleção do modelo de formulação**: a formulação matemática depende da caracterização do sistema e da abordagem que será dada. Por exemplo, a modelagem da vida de um equipamento pode considerar os estados em operação e falho, ou alternativamente, em operação, defeituoso, e falho. Mais considerações sobre a caracterização do sistema serão apresentadas no início do tópico referente à modelagem *delay time*.
- **Passo 4 – Estimação de parâmetros**: define os parâmetros das formulações matemáticas utilizadas no modelo. No caso de formulações probabilísticas e estocásticas, como o caso da modelagem *delay time*, a estimação dos parâmetros podem ser divididas em estimações não estatísticas e estatísticas.
- **Passo 5 – Validação do modelo**: consiste em analisar se o modelo selecionado imita o comportamento do sistema razoavelmente bem para produzir soluções significativas para o problema de interesse.
- **Passo 6 – Análise do modelo**: analisa-se o modelo de modo a apontar as soluções para o problema.
- **Passo 7 – Solução do problema**: geralmente, as soluções são obtidas por meio analítico (expressões matemáticas que envolvem os parâmetros e variáveis do modelo) ou computacional (geração de soluções aproximadas baseadas em métodos numéricos).
- **Passo 8 – Implementação da solução**: dado que o modelo representa a realidade de forma simplificada, uma avaliação cuidadosa da solução dever ser analisada. De fato, a solução deve servir como base ou como ferramenta para a tomada de decisão.

A Figura 1 apresenta uma esquematização do processo de modelagem matemática.

Figura 1 – Processo de Modelagem Matemática



Fonte: Adaptada de Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016, p.185)

A execução dessas etapas contribui para um sequenciamento adequado para o desenvolvimento de um modelo que garanta uma boa representação da realidade. Todas elas são importantes e contribuem para análise e desenvolvimento de aspectos distintos. O próximo capítulo aprofunda como cada etapa pode ser desenvolvida a partir da integração deste passo a passo com metodologias de identificação de problemas, caracterização do sistema, e formulação matemática.

As formas de caracterização do sistema influenciam na seleção do modelo e *a posteriori* na adequação e na reformulação matemática. Por conta disso, esta dissertação propõe uma metodologia que insere algumas modificações importantes no passo a passo acima apresentado, incluindo a abordagem *snapshot* como uma ferramenta que possibilita uma melhor caracterização do sistema. Além disso, alguns aspectos relacionados com uma metodologia de aplicação de modelagem *delay time* na prática são levados em consideração.

Posto isso, os tópicos seguintes tratam da abordagem *snapshot* e da modelagem *delay time*. O insight motivador para a utilização dessas abordagens consiste em utilizá-las como instrumento de auxílio no desenvolvimento de uma metodologia de elaboração de modelos mais condizentes com a realidade.

2.2.3 Abordagem *snapshot*

A abordagem *Snapshot* fornece uma representação da manutenção sob a perspectiva operacional e pode ser aplicada para a obtenção de dados mais específicos que podem servir como base para modelos de otimização.

O termo "*snap-shot model*" foi estabelecido por Christer e Whitelaw (1983) para indicar um tipo particular de análise de dados subjetivos que conduz a um modelo capaz de caracterizar a situação atual da manutenção em uma determinada empresa. À época, esse modelo foi definido e aplicado num contexto de identificação de problemas para uma abordagem de pesquisa operacional em casos de manutenção corretiva.

Christer e Whitelaw (1983) defendem que um controle efetivo da manutenção requer a capacidade de definir a natureza dos problemas relacionados a ela e não somente o impacto deles. Por isso, a *snapshot* busca identificar informações potencialmente disponíveis relativas à causa, à consequência e aos possíveis meios de prevenção de falhas.

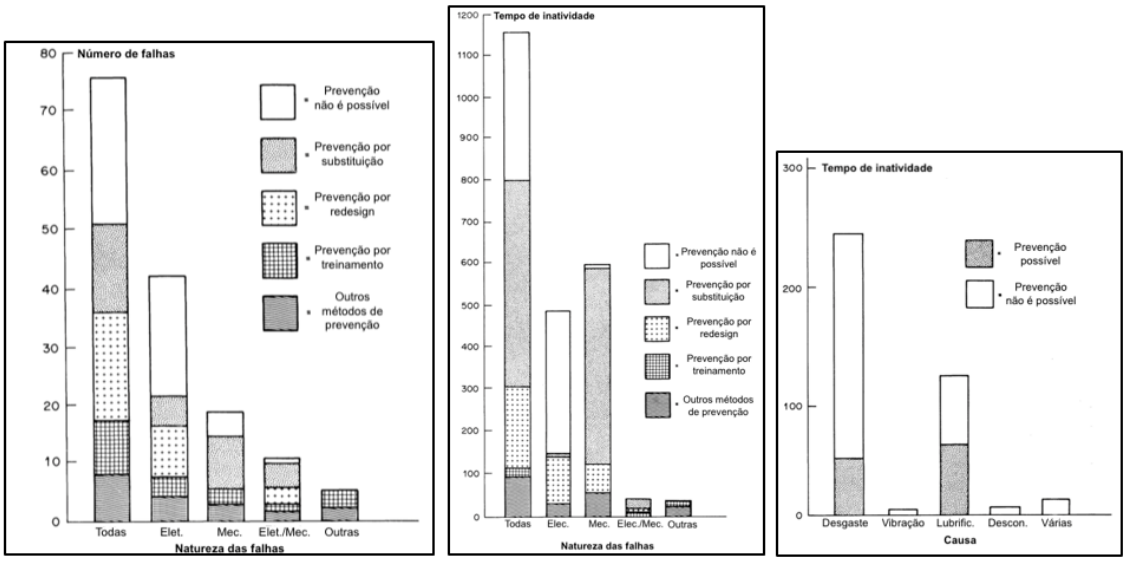
- **Causa da falha**: refere-se ao motivo da falha, por exemplo, erro humano, falha no projeto, desgaste e envelhecimento, acidente e sobrecarga. Esse tipo de dado pode ajudar a estabelecer a natureza da fonte de problemas da planta industrial.
- **Consequências da falha**: relacionam-se com as penalidades ou inconvenientes proporcionados pela ocorrência da falha. Em geral essas consequências podem ser medidas em termos de tempo de inatividade e produção perdida em decorrência dessa inatividade. Esse tipo de dado permite verificar a influência de uma mudança na política de manutenção.
- **Meios de prevenção**: são as formas pelas quais se pode evitar que uma falha ocorra, por exemplo, por meio de uma manutenção preventiva, um reprojeto do processo, um treinamento de operadores, uma substituição periódica de algum componente, ou um *re-design* do equipamento.

As informações referentes a esses três aspectos são obtidas por meio de um questionário a ser respondido pelos mantenedores sempre que executarem uma manutenção corretiva. O objetivo desse questionário é poder caracterizar as falhas do sistema, dando uma visão geral sobre a natureza, a causa, o impacto e a possibilidade de prevenção. Essa abordagem subjetiva

é relevante devido à falta de dados suficientes para a modelagem de problemas de manutenção, sobretudo nos países em desenvolvimento (SCARF, 1997; DESA; CHRISTER, 2001).

À título de ilustração, algumas possibilidades de representações gráficas, provenientes de estudos de caso desenvolvidos por Christer e Whitelaw (1983), são mostradas na Figura 2 para ilustrar a simplicidade e potencialidade dessa abordagem no que concerne ao diagnóstico da situação da manutenção.

Figura 2 – (a) Relação do número de falhas com sua natureza e possibilidade de prevenção. (b) Relação do tempo de inatividade com sua natureza e possibilidade de prevenção. (c) Relação do tempo de inatividade com sua causa e possibilidade de prevenção



(a) *(b)* *(c)*

Fonte: Adaptadas de Christer e Whitelaw (1983, p. 1045, 1047 e 1050)

Analisando-se a Figura 2(b), percebe-se que a maior parte do tempo de inatividade (*downtime*) pode ser evitado por meio de políticas de substituição preventiva, de reprojeto e também, com menor impacto, através de treinamento e de outros métodos de prevenção. Além disso, nota-se que as falhas que corroboram com o maior tempo de inatividade estão relacionadas com equipamentos mecânicos, os quais apresentam como característica sinais de desgaste antes de falhar. Outrossim, a substituição preventiva é indicada como uma possível prevenção para essas falhas, de modo que modelos como *delay time*, apresentado em seguida, poderiam contribuir para o melhor desempenho da manutenção, reduzindo este tempo de inatividade e diminuindo custos.

Como pode-se perceber, o *Snapshot* contribui para uma caracterização geral dos problemas operacionais relacionados com a atividade de manutenção de uma determinada empresa, também leva em consideração fatores de interferência humana e mostra claramente

um possível direcionamento para o desenvolvimento de melhorias e modelagens condizentes com a realidade prática.

Além da possibilidade de diagnosticar a manutenção de forma mais operacional, a *snapshot* pode servir como base para a estimação de dados os quais poderão ser aplicados em modelos de otimização matemática, sendo frequentemente utilizada em conjunto com a modelagem *delay time* em vários contextos, como: manutenção de plantas industriais, frotas de veículos, estruturas de engenharia civil, equipamentos hospitalares, fábrica de produtos de cobre, fábrica de aço, etc. (DESA; CHRISTER, 2001).

Desa e Christer (2001), por exemplo, aplicam esses modelos de forma conjunta em estudo de caso relativo à manutenção de uma frota de ônibus. Nesse estudo, a análise *snapshot* foi desenvolvida para reconhecer e descrever a escala e a natureza dos problemas de manutenção, obtendo uma figura clara da situação atual da demanda por manutenção; identificar e sinalizar as potenciais áreas para melhoria e mudança; e estimar parâmetros utilizados na modelagem do *delay time*.

À luz dessas considerações, percebe-se a importância da *snapshot* para o contexto da identificação de problemas e oportunidades de melhoria em manutenção devido a sua capacidade de descrever a situação operacional da manutenção e ao fato de possibilitar o levantamento de informações importantes para aplicação em modelos de otimização.

A próxima seção aborda o conceito *delay time*, indica o contexto em que ele pode ser utilizado e mostra a modelagem inicialmente proposta no seu desenvolvimento.

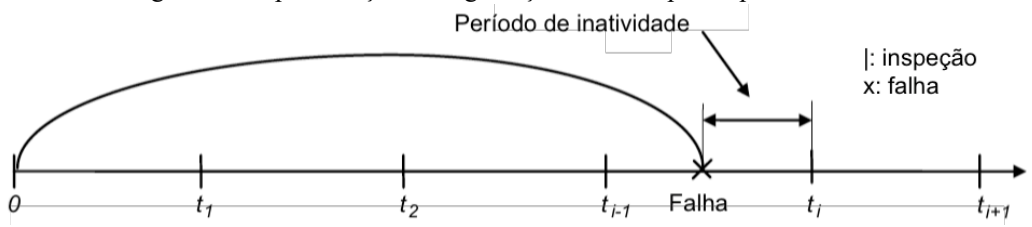
2.2.4 Modelagem *delay time*

A caracterização da redução do desempenho de um componente pode ser realizada por meio de dois ou mais estágios distintos. No primeiro caso, o componente encontra-se em estado operacional (1) ou em estado falho (0). Considerando, por exemplo, que a degradação ocorre em função da idade t do componente e que $X(t)$ representa seu estado: $X(t) = 1$ indica que o estado é operacional, satisfatório ou aceito e $X(t) = 0$ indica que o estado é falho, insatisfatório ou não-aceito (*BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016*).

Os modelos de manutenção que visam determinar o período ótimo de inspeção, por exemplo, podem incorporar esses estados da seguinte maneira: o componente é inspecionado nos instantes $t_1, t_2, t_3, \ldots$ quando a inspeção revela que o componente está em estado falho (nesse caso a falha não se auto-anuncia), ele é substituído por outro novo e o componente retorna ao estado operacional, tão bom quanto novo. Nesse caso, os custos de inspeção, substituição e indisponibilidade, relativos ao período em que o componente ficou sem operar,

são contabilizados. Quando uma inspeção é realizada e o sistema encontra-se no estado operacional, nenhuma ação de reparo ou substituição necessita ser realizada e o equipamento continua operando normalmente. Nesse caso, apenas o custo de inspeção é contabilizado (CHELBI; AIT-KADI, 2009). A Figura 3 esquematiza o exemplo acima, no qual apenas dois estados são considerados na modelagem.

Figura 3 – Representação de degradação de desempenho por dois estados



Fonte: Adaptada de Chelbi e Ait-Kadi (2009, p. 306)

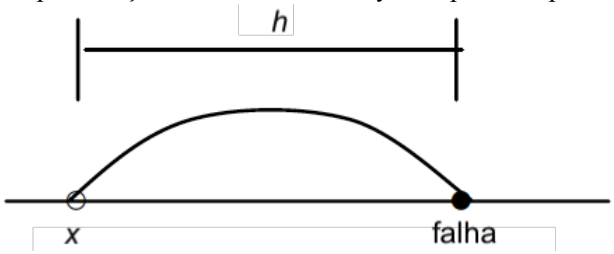
O exemplo supracitado ilustra o fato da falha ocorrer de forma abrupta não sendo possível identificar estado anterior, indicativo de proximidade ao estado de falha. Esse tipo de modelagem, que envolve a consideração de dois estados, pode ser utilizado para uma variedade de contextos práticos. No entanto, muitas vezes o item em análise pode apresentar sinais que antecedem a falha e que dão indicativos do aumento de chances desta ocorrer. A modelagem *delay time* é uma forma de se considerar matematicamente essa possibilidade, incluindo o estado defeituoso.

Na prática, a caracterização de um estado defeituoso pode ser associada a um processo de desgaste no componente, o que é comum, por exemplo, em componentes mecânicos. Este tipo de item pode sofrer deterioração física, química ou devida ao envelhecimento, à corrosão, à erosão, à fadiga do material, etc. (CARTER, 1986). A variedade no tipo de desgaste e a possível sinalização de uma falha futura implicam na necessidade da consideração do defeito na modelagem matemática da manutenção. É nesse contexto que a modelagem *delay time* revela sua importância, para melhor caracterizar a vida de um componente que se desgasta ao longo do tempo e se deteriora antes de falhar.

O *delay time* foi apresentado pela primeira vez por Christer (1976). Nessa modelagem, a caracterização da degradação do desempenho de um componente é realizada por meio de três estágios distintos: operacional, defeituoso, e falho. O processo de falha acontece em dois estágios, ou seja, antes do componente falhar, ele passa um determinado tempo no estado defeituoso. Dessa forma, um defeito chega ao componente em um determinado tempo x e depois de um intervalo de tempo h o componente falha (BAKER; CRHISTER, 1994). A Figura

4 mostra a representação do período de delay time h, desde o surgimento do defeito até a chegada da falha.

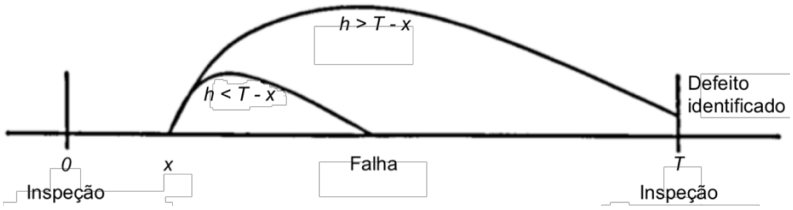
Figura 4 – Representação do conceito de delay time para componente simples



Fonte: Adaptada de Wang (2008, p. 347)

Dado que x é o instante da chegada do defeito, e que a próxima inspeção será realizada no instante T, a falha ocorre se $h < T - x$ e o defeito é identificado na inspeção se $h > T - x$ (Figura 5).

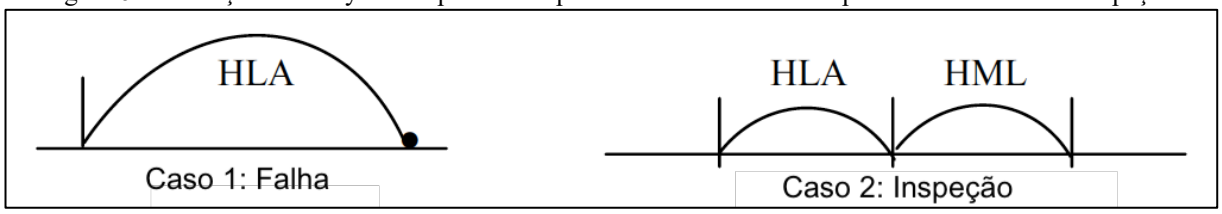
Figura 5 – Transformação do defeito em falha e identificação do defeito



Fonte: Adaptada de Lee (1999, p. 38)

O valor de h para o defeito pode ser obtido considerando duas perguntas que devem ser realizadas no momento em que ocorre algum reparo, seja por conta de uma falha ou devido à detecção de um defeito na inspeção: há quanto tempo o defeito poderia ter sido notado por uma inspeção ou por um operador (=HLA) e se o reparo não for realizado, por quanto tempo ele pode ser postergado (=HML) (Figura 6). O delay time para cada defeito é a soma desses dois tempos $h = HLA + HML$ (CHRISTER; WALLER, 1984).

Figura 6 – Obtenção do delay time a partir do reparo de uma falha ou do reparo de um defeito na inspeção

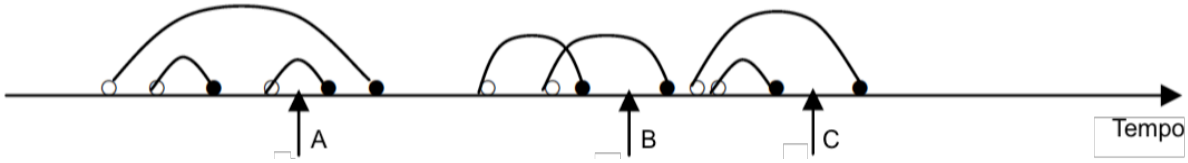


Fonte: Adaptada de Wang (2008, p. 361)

É importante ressaltar que uma simples resposta a essas perguntas pode gerar dados tendenciosos, de modo que é preciso fazer uma correção do viés do respondente por meio de técnicas de estimação de dados subjetivos as quais podem ser encontradas em maior detalhe no trabalho de Wang (1997) e Wang (2008).

No caso de uma planta complexa, ou seja, de um sistema com múltiplos componentes, uma representação para os defeitos e falhas pode ser visualizada na Figura 7.

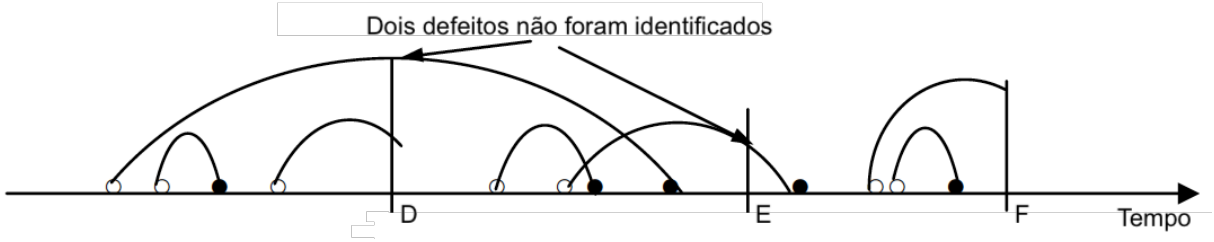
Figura 7 – Representação do conceito de delay time para sistema multi-componente.
A circunferência representa o momento da chegada do defeito e o circulo preto a chegada da falha



Fonte: Adaptada de Wang (2008, p. 348)

Considerando a Figura 7, se as ações de inspeção A, B, e C não fossem realizadas, sete falhas ocorreriam no sistema. Se uma inspeção é realizada no instante de tempo A, dois defeitos podem ser identificados e duas falhas evitadas. Se duas inspeções são realizadas, nos instantes de tempo A e B, três falhas são evitadas e se três inspeções são realizadas, nos instantes de tempo A, B e C, quatro falhas são evitadas. Neste caso, as inspeções perfeitas permitem a identificação e reparo dos defeitos antes que a falha venha a ocorrer. Pode ocorrer, entretanto, de as inspeções serem imperfeitas e não detectarem o estado defeituoso. Esse caso é representado na Figura 8.

Figura 8– Inspeções imperfeitas em sistema multi-componente



Fonte: Adaptada de Wang (2008, p. 350)

Na figura 8, a inspeção D não consegue identificar um dos defeitos, possibilitando a redução de uma falha, de duas possíveis. A inspeção E não detecta um defeito, que se transforma em falha em seguida, e a inspeção F consegue evitar que um defeito se transforme em falha. As situações apresentadas nas Figuras 4, 7 e 8 mostram como o conceito de *delay time* pode ser

visualizado considerando alguns casos distintos, como a aplicação em um sistema de componente simples, complexo, ou com inspeções imperfeitas. Esses casos foram os inicialmente apresentados no início do desenvolvimento da modelagem matemática da manutenção por meio do conceito *delay time*.

A formulação matemática base para os modelos que abordam essas situações é apresentada em seguida, baseada nos trabalhos de Christer e Waller (1984), Lee (1999) e Wang (2008).

2.2.4.1 Delay time para planta complexa

Christer e Waller (1984) apresentam um modelo básico para a situação mais simples de aplicação do conceito *delay time* para um sistema multicomponente. Este modelo é também descrito por Lee (1999) e mostrado abaixo de acordo com as explicações deste autor. O modelo é baseado nas seguintes hipóteses:

(i) Uma inspeção ocorre a cada T unidades de tempo, custa C_i unidades monetárias e requer d unidades de tempo, sendo $d \ll T$.

(ii) As inspeções são perfeitas, de modo que qualquer defeito presente será identificado.

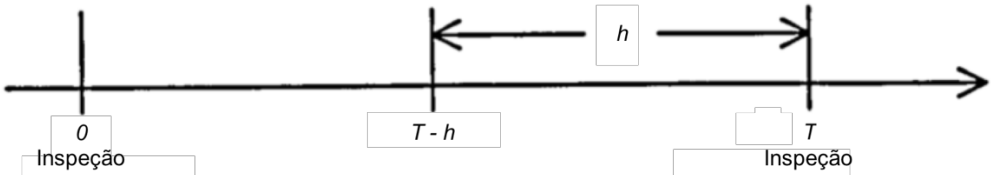
(iii) Os defeitos identificados em uma inspeção são reparados no próprio período de inspeção.

(iv) O instante inicial da chegada do defeito (também conhecido como a origem do defeito) é uniformemente distribuído ao longo do tempo, desde a última inspeção, e independente do período em estado defeituoso. Além disso, os defeitos surgem a uma taxa k por unidade de tempo.

(v) A função densidade de probabilidade, pdf, do delay time é conhecida $f(h)$.

Supondo que um defeito que chega no período $(0, T)$ tem um *delay time* no intervalo $(h, h + dh)$, a probabilidade deste evento ocorrer é dada por: $f(h)dh$. Se o defeito chegar no intervalo $(0, T - h)$ ele se transformará em falha e será reparado com uma manutenção corretiva, caso contrário, o defeito será identificado e reparado na próxima inspeção (Figura 9).

Figura 9 – Tempo em estado defeituoso para falha e para identificação do defeito na inspeção



Fonte: Adaptada de Lee (1999, p. 40)

Considerando que um defeito chegará no intervalo, a probabilidade dele chegar antes de $(T-h)$, é $(T-h)/T$. Deste modo, a probabilidade de um defeito chegar dentro do intervalo e se transformar em falha dentro do intervalo $[0,T]$ é $[(T-h)/T]f(h)dh$. Considerando todas as possibilidades de *delay time* (de permanência em estado defeituoso) dentro do intervalo $[0,T]$, a probabilidade de um defeito se transformar em falha é:

$$b(T) = \int_{h=0}^{T} \left(\frac{T-h}{T} \right) f(h)dh \tag{2.4}$$

Como o defeito chega com uma taxa k por unidade de tempo (suposição *iv*), o número esperado de defeitos chegando em $[0,T]$ é: $K(T) = kT$ e o número esperado de falhas no mesmo intervalo é: $B(T) = K(T)b(T) = kTb(T)$. Uma vez que $B(T)$ foi determinado, o *downtime* (ou tempo de inatividade) pode ser determinado pela Equação (2.5), na qual d_b é o tempo médio para o reparo e d é a duração de uma inspeção.

$$D(\mathrm{T}) = \frac{1}{(T+d)}\left[kTd_b b(T) + d\right] \tag{2.5}$$

Considerando que C_f representa o custo de falha, C_r é o custo de reparo de um defeito em uma inspeção e C_i é o custo de uma inspeção. O custo esperado para manter o sistema em um regime de inspeções a cada T unidades de tempo é:

$$C(T) = \frac{1}{(T+d)}\left[\!\left[kT\left\{C_f b(T) + C_r\left[1-b(T)\right]\right\} + C_i \right]\!\right] \tag{2.6}$$

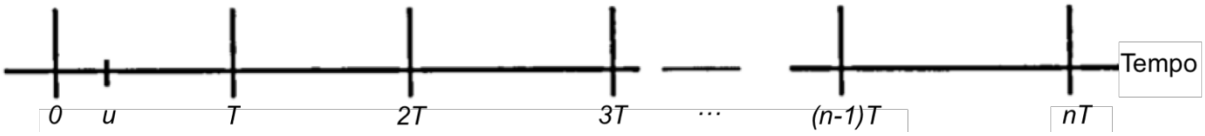
Segundo Christer e Waller (1984), as Equações (2.4), (2.5) e (2.6) representam a modelagem básica do *delay time para* um sistema multicomponente. No caso das inspeções serem imperfeitas, a modelagem pode ser realizada da seguinte forma, conforme o trabalho desenvolvido por Lee (1999).

Considerando que os defeitos podem ou não serem identificados nas inspeções, r representa a probabilidade de um defeito específico ser identificado na inspeção e $(1-r)$ representa a probabilidade de um defeito específico não ser identificado na inspeção. Como é assumido que o surgimento do defeito é uniformemente distribuído ao longo do intervalo $[0,T]$, a única coisa que mudará, em relação à modelagem anteriormente mostrada, é a probabilidade

de um defeito se transformar em falha dentro desse intervalo, ou seja, a probabilidade de uma falha ocorrer no intervalo, $b(T)$.

Considerando que um defeito chega no ponto u (Figura 10), se ele é detectado em uma inspeção, ele pode ser identificado em T, se $h > (T - u)$; em $2T$, se $h > (2T - u)$; em $3T$, se $h > (3T - u)$; e assim por diante.

Figura 10 – Exemplo de processo de inspeção de um defeito chegando no momento u



Fonte: Adaptada de Lee (1999, p. 44)

A probabilidade de um defeito iniciado em u ser identificado em T, é a probabilidade de o defeito ser identificado em T (representada pela letra r), vezes a probabilidade de não ocorrer uma falha antes de T (representada por $R(T-u)$), ou seja: $rR(T-u)$, onde $R(x) = \int_x^{\infty} f(h)dh$. Da mesma maneira, a probabilidade de um defeito iniciado em u ser identificado em $2T$, é a probabilidade de o defeito ser identificado em $2T$ e não ter sido identificado em T, vezes a probabilidade de não ocorrer uma falha antes de $2T$, ou seja: $r(1-r)R(2T-u)$. De modo geral, a probabilidade de um defeito iniciado em u ser identificado na inspeção nT é $r(1-r)^{n-1}R(nT-u), n = 1, 2, \ldots$

Assim, a probabilidade de um defeito iniciado em u ser identificado em uma inspeção é $\sum_{n=1}^{\infty} r(1-r)^{n-1}R(nT-u)$. Considerando todas as possibilidades de u, que é uniformemente distribuído ao longo de T, tem-se que a probabilidade de um defeito se transformar em uma falha dentro do intervalo $(0, T)$ é dada pela Equação (2.7), onde $R(\cdot) = 1 - F(\cdot)$ e $F(\cdot)$ é a função de distribuição acumulada do *delay time*.

$$b(T) = 1 - \int_{u=0}^{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r}{T}(1-r)^{n-1}R(nT-u)du \tag{2.7}$$

As modelagems apresentadas neste sub-tópico compreendem a base para a abordagem *delay time* em sistemas multicomponentes. A depender das características do problema a ser modelado, algumas alterações são realizadas para melhor corresponder à realidade. A consideração que a inspeção é imperfeita, acima apresentada, é um exemplo de alteração que pode ser conveniente a depender do contexto prático que o modelo seja aplicado, outros exemplos que podem ser citados nesse mesmo sentido são: a consideração de uma distribuição

não-uniforme para o tempo de chegada do defeito (CHRISTER; WALLER, 1984) e o relaxamento da suposição que considera que defeitos identificados em uma inspeção são reparados no próprio período de inspeção, tendo-se que alterar a forma de cálculo do período de inatividade (LEE, 1999).

2.2.4.2 Delay time para componente simples

Este sub-tópico apresenta a modelagem *delay time para* um sistema com um componente ou com mais de um componente, mas apenas um modo de falha dominante, que é posto em análise. Um sistema de componente simples pode ser interpretado como um componente e um soquete que juntos executam uma função operacional (ASCHER; FEINGOLD, 1984; SCARF; CAVALCANTE, 2012). Este tipo de sistema pode ser visualizado na operação de baterias, semáforos, bombas de sucção, motores, etc.

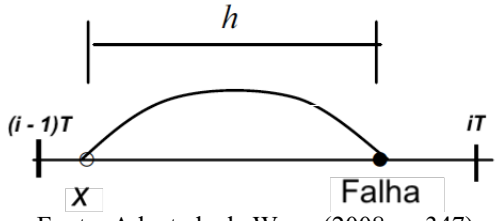
Wang (2008) apresenta modelagens considerando inspeções perfeitas para os casos em que o tempo inicial do defeito é exponencialmente distribuído e também para quando é não-exponencialmente distribuído. O caso de inspeção imperfeita pode ser encontrado em Baker e Wang (1993).

A modelagem apresentada nesta seção considera as suposições adotadas por Wang (2008) e é baseada no trabalho de Santos e Cavalcante (2018a). O modelo de *delay time* que considera inspeções perfeitas para componente simples, com o tempo inicial de defeito não-exponencialmente distribuído é baseado nas seguintes hipóteses (WANG, 2008):

(i) O sistema é renovado tanto num reparo de uma falha quanto no reparo de um defeito identificado em uma inspeção.
(ii) Após a renovação em uma falha ou em um defeito identificado na inspeção, o processo de inspeção se reinicia.
(iii) O tempo inicial de aparecimento do defeito aleatório tem a função densidade de probabilidade $f_x(x)$.
(iv) O componente defeituoso identificado na inspeção será renovado por um reparo ou substituição com um custo médio C_p.

Considerando as hipóteses acima apresentadas e a Figura 11, abaixo representada, determina-se o intervalo de inspeções que minimiza o custo total esperado em um ciclo de inspeções (Equação (2.8)). Este custo inclui o custo de inspeção, C_i, custo médio de reparar um defeito, C_p, e o custo da falha, C_f.

Figura 11 – Delay time para componente simples



Fonte: Adaptada de Wang (2008, p. 347)

$$E(T) = \frac{C(T)}{L(T)} \tag{2.8}$$

De acordo com a Figura 11, $C(T)$ e $L(T)$ podem ser determinado considerando duas possibilidades: a falha ocorrer no intervalo $(x + h \in [(i-1)T,\ iT])$ e a falha não ocorrer no intervalo $(x \in [(i-1)T,\ iT]\ ;\ h > iT - x)$. Deste modo, $C(T)$ e $L(T)$ podem ser determinados conforme as equações (2.9) e (2.10), respectivamente.

$$C(T) = \sum_{i=1}^{\infty}[iC_i + C_p] \int_{(i-1)T}^{iT} f(x)R_h(iT-x)dx + \sum_{i=1}^{\infty}[(i-1)C_i + C_f] \int_{(i-1)T}^{iT} f(x)F_h(iT-x)dx \tag{2.9}$$

$$L(T) = \sum_{i=1}^{\infty} iT \int_{(i-1)T}^{iT} f(x)R_h(iT-x)dx + \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} f(x)\left[\int_{0}^{(iT-x)} (x+h)f(h)dh\right]dx \tag{2.10}$$

A primeira parte das equações acima (à esquerda) representa a situação na qual a falha não ocorre no intervalo e a segunda parte (à direita) representa a situação na qual a falha ocorre no intervalo. O somatório de 1 a infinito considera todas as inspeções necessárias devido aos defeitos e falhas que podem chegar no processo de falha de um componente simples ao longo do tempo.

Em muitas situações práticas, o custo da falha é muito maior do que o custo da inspeção ou custo para reparar um item defeituoso, pois ele é influenciado por algum inconveniente trazido para o sistema, como um período de inatividade desde que a falha é iniciada até sua reparação. Consequentemente, os intervalos de inspeção tendem a ser determinados para evitar falhas e suas influências negativas no sistema (SANTOS; CAVALCANTE, 2018a).

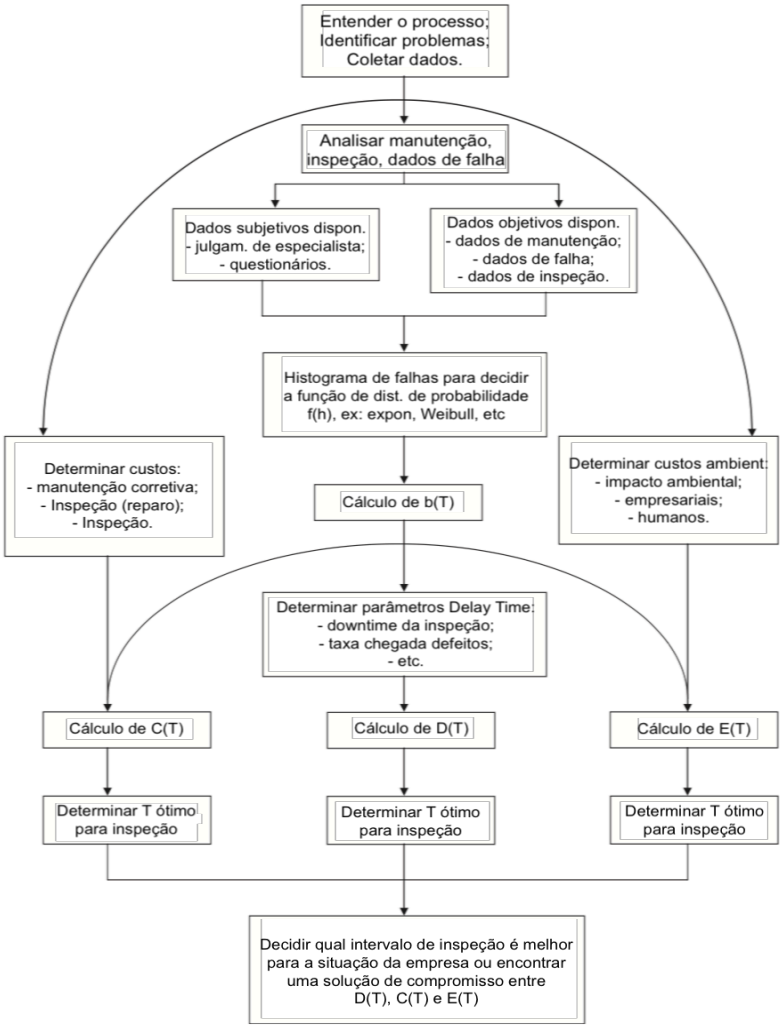
2.2.4.3 Contribuições recentes para a modelagem delay time

Este tópico versa sobre alguns exemplos de estudos recentes relacionados com o desenvolvimento e aplicação da modelagem *delay time*. São apresentados: uma metodologia para sua utilização, modificações na modelagem e novos modelos com base no *delay time.*

No que se refere à metodologia para aplicação do conceito na prática, Jones, Jenkinson e Wang (2009) desenvolveram um *framework* para a utilização do *delay time* no contexto industrial, com o objetivo de reduzir o tempo de inatividade da planta e os custos de manutenção, considerando o impacto das falhas no sistema. Além disso, outro aspecto levado em consideração, de forma subjetiva, é a consequência das falhas em termos de custo ambiental, monetário e dos efeitos prejudiciais à imagem da empresa.

A metodologia desenvolvida por Jones, Jenkinson e Wang (2009) segue as seguintes etapas, e é estruturada de acordo com o *framework* mostrado na Figura 12: 1) Entendimento do processo, 2) Identificação dos problemas, 3) Identificação dos dados necessários, 4) Coleta de dados, 5) Análise de dados objetivos, 6) Análise de dados subjetivos, 7) Verificação de vantagens e desvantagens relacionadas aos dados, 8) Validação dos *delay-times* e suas distribuições, 9) Estabelecimento de suposições, 10) Estabelecimento de modelo para o tempo de inatividade, para o custo e para a consideração do aspecto ambiental.

Figura 12 – Framework de metodologia para aplicação do Delay Time



Fonte: Adaptada de Jone, Jenkinson e Wang (2009, p. 144)

Esta metodologia, em conjunto com a abordagem *snapshot*, proposta por Christer e Whitelaw (1983), e com o passo a passo estabelecido por Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016) servirão como base para a metodologia proposta nesta dissertação com o intuito de desenvolver um passo a passo para o desenvolvimento da modelagem em manutenção.

No contexto de modificações na modelagem e proposição de novos modelos, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos em variados contextos (WANG, 2011; WANG et al., 2011; WANG, 2012; SCARF; CAVALCANTE, 2012; BERRADE; SCARF; CAVALCANTE, 2017; SANTOS, CAVALCANTE, 2018a; ALBERTI et al., 2018).

A abrangência de trabalhos envolvendo *delay time* se deve a ampla possibilidade de situações as quais a falha se anuncia previamente em forma de defeito, por exemplo no caso de desgaste de equipamentos mecânicos, abordado no tópico anterior. Como cada caso apresenta particularidades distintas, é comum que modificações na modelagem sejam necessárias para uma melhor representação da realidade.

No contexto de análise de estoque de peças de reposição, Wang (2011) apresenta um modelo, pautado no conceito de *delay time,* para relacionar a atividade de manutenção preventiva com a necessidade de peças, otimizando tanto o intervalo entre pedidos quanto a quantidade de pedidos.

No que concerne à consideração de inspeções imperfeitas, Wang et al. (2011) desenvolvem um modelo *delay time* para situações de inspeções imperfeitas e estabelecem uma forma de priorizar a disponibilidade a longo prazo. Scarf e Cavalcante (2012) também consideram inspeções imperfeitas para modelar a qualidade da manutenção analisando tanto a inspeção e sua possibilidade de indução de defeitos quanto a substituição de componentes heterogêneos que seguem um processo de falha de acordo com a abordagem *delay time.* Alberti et al. (2018) desenvolvem uma análise semelhante mas voltada especificamente para sistemas de proteção.

No que se refere à análise do tempo em estado defeituoso, Berrade, Scarf e Cavalcante (2017) utilizam o conceito *delay time* para verificar em que circunstâncias um mantenedor pode adiar uma substituição, ou seja, avaliam situações em que a manutenção pode não ser executada imediatamente após a descoberta de um defeito no sistema. O possível impacto da permanência no estado defeituoso no custo de uma política de inspeção, para o caso de componente simples, é levado em consideração por Santos e Cavalcante (2018a) e apresentado em maior detalhe no capítulo 4 desta dissetação, que trata sobre a possibilidade de inserção do custo relacionado com o tempo em estado defeituoso para modelos *delay time*.

O constante aperfeiçoamento e a proposição de novos modelos, como mostrado acima, é importante para que a modelagem possa de fato ser empregada para a solução de problemas reais. De fato, a diversidade de situações nas quais políticas de manutenção são aplicadas nas indústrias requer modelos específicos que sejam uma boa representação da realidade. Nesse contexto, o próximo tópico trata da importância do desenvolvimento de uma modelagem que esteja em consonância com o contexto prático a ser aplicado.

2.2.5 Do desenvolvimento teórico à abordagem prática

Ascher e Feingold (1984) e Scarf (1997) apontam que um dos principais problemas relacionados com a modelagem matemática aplicada à manutenção é que a complexidade muitas vezes apresentada na modelagem faz com que o modelo não tenha uma aplicação prática na realidade, ocorrendo, assim, a existência de um elaborado exercício matemático, mas que não se aplica a casos reais.

Além disso, os mesmos autores destacam que muitas vezes não se têm informações suficientes para modelar o problema de manutenção. Estas informações não se referem somente a questões específicas e objetivas, como tempo de falha, etc., mas todas as informações relacionadas com o processo em estudo.

Nesse contexto, Scarf (1997) esclarece sobre a importância do levantamento de dados subjetivos para a caracterização do contexto ao qual a política de manutenção será empregada, sobretudo quando existe escassez de dados objetivos. Uma abordagem subjetiva, por exemplo, pode servir como uma forma de estimar parâmetros de modelos específicos. Ressalta-se, porém, que a validação de informações subjetivas às vezes pode ser suspeita pois geralmente são obtidas pelos responsáveis do setor de manutenção da empresa.

À luz dessas considerações, verifica-se a necessidade de metodologias que auxiliem na identificação do problema de interesse, na caracterização do sistema a ser modelado, estimação de parâmetros, desenvolvimento e/ou adequação das formulações matemáticas, entre outros aspectos. De fato, procedimentos para desenvolvimento de modelagens devem proporcionar que os aspectos mais relevantes da realidade possam ser efetivamente inseridos nos modelos.

Nesse sentido, a hipótese inicial para o desenvolvimento desta dissertação e solução do problema de pesquisa anteriormente apresentado é:

Hipótese inicial: a análise e integração de metodologias que tratam de aspectos distintos relacionados com a modelagem matemática da manutenção pode contribuir para o desenvolvimento de um *framework* base para a elaboração de modelos matemáticos mais

condizentes com a realidade modelada. Este *framework* pode servir como base para o desenvolvimento de estudos de caso na área de modelagem em manutenção.

Nesse contexto, o próximo capítulo propõe uma metodologia para o desenvolvimento de modelagem em manutenção, com o intuito de auxiliar na elaboração de modelos que efetivamente possam ser aplicados em situações reais.

2.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a base conceitual e a revisão da literatura referentes à área de estudo desta dissertação. Inicialmente, importantes aspectos relacionados com a manutenção foram abordados e discutidos sob a perspectiva de apresentação de conceitos consolidados na literatura. Nesse sentido, foram abordadas questões referentes à definição, classificação, funções e objetivos, políticas e importância da manutenção no contexto industrial atual. Em seguida, abordou-se questões referentes ao aspecto da modelagem, como confiabilidade, etapas de um processo de modelagem, abordagem *snapshot* e modelagem *delay time*. Por fim, discutiu-se sobre a importância do desenvolvimento teórico de modelos ter uma aplicação prática e apresentou-se a hipótese inicial da pesquisa.

3 METODOLOGIA PARA MODELAGEM EM MANUTENÇÃO

Este capítulo trata da proposta de uma metodologia para o desenvolvimento de modelagem em manutenção. Esta metodologia é baseada na abordagem *snapshot*, proposta por Christer e Whitelaw (1983), no processo de modelagem matemática para resolução de problemas reais, proposto por Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016), na metodologia para aplicação prática de modelos *delay time*, desenvolvida por Jones, Jenkinson e Wang (2009), e nas considerações sobre a estimação subjetiva de parâmetros apontadas por Wang (2008).

Nesta seção, objetiva-se fundamentar teoricamente a metodologia proposta; explicar o funcionamento do passo a passo estabelecido; esquematizar os subpassos de cada etapa, mostrando seus objetivos e contribuições; e estruturar um *framework* a ser seguido no desenvolvimento ou reformulação de uma modelagem a partir da análise de um dado caso real.

A estruturação da metodologia proposta segue o passo a passo apontado por Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016) para a modelagem matemática de problemas reais. Contudo, são sugeridas algumas modificações, para que possam ser inseridas outras considerações importantes por meio de abordagens para a identificação do problema e a caracterização do sistema.

Nesse contexto, a abordagem *snapshot* é inserida, uma etapa de seleção de modelos é introduzida, assim como uma etapa para levantamento de dados e outra para análise de formulações matemáticas já estabelecidas na literatura. Além disso, a metodologia desenvolvida por Jones, Jenkinson e Wang (2009), para aplicação prática de modelos *delay time*, também serve como base para a inserção de possibilidades referentes a modelos de manutenção com mais de uma fase para falha.

O Quadro 3 mostra o passo a passo estabelecido por Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016) (à esquerda) e por Jones, Jenkinson e Wang (2009) (à direita).

Quadro 3 – Metodologias de modelagem bases para a metodologia proposta

Processo de Modelagem Matemática (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016)	**Metodologia de Utilização de Análise *Delay Time* para Indústria de Manufatura** (JONES; JENKINSON; WANG, 2009)
1. Definição do problema 2. Caracterização do sistema 3. Seleção do modelo de formulação 4. Estimação de parâmetros 5. Validação do modelo 6. Análise do modelo 7. Solução do problema 8. Implementação da solução	1. Entendimento do processo 2. Identificação dos problemas 3. Identificação dos dados necessários 4. Coleta de dados 5. Análise de dados objetivos 6. Análise de dados subjetivos 7. Verificação de vantagens e desvantagens relacionadas aos dados 8. Validação dos *delay-times* e suas distribuições 9. Estabelecimento de suposições 10. Estabelecimento de modelo para o tempo de inatividade, para o custo e para a consideração do aspecto ambiental

Fonte: adaptada de Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016) e Jones, Jenkinson e Wang (2009)

O Quadro 4 mostra o passo a passo da metodologia proposta por esta dissertação.

Quadro 4 – Metodologia para Modelagem Matemática da Manutenção

Caracterização do caso em estudo	**Formulação matemática**	**Solução e implementação prática**
1. Entendimento do processo **2.** Abordagem *Snapshot* - Causa das falhas - Consequências das falhas - Meios de prevenção **3.** Definição do problema **4.** Caracterização do sistema	**5.** Seleção de modelo de formulação - Comp. simples ou complexo - Número de estágios **6.** Levantamento de dados **7.** (Re)Formulação matemática **8.** Estimação de parâmetros **9.** Análise e validação do modelo	**10.** Solução do problema **11.** Implementação da solução

Fonte: O autor (2019)

A metodologia proposta agrega as potencialidades das duas metodologias bases e insere análises provenientes de outras abordagens para o desenvolvimento de etapas específicas, como por exemplo, a abordagem snapshot, que se tornou etapa específica dada a sua importância na caracterização do caso em estudo.

De forma geral, as etapas que foram inseridas foram identificadas por meio da revisão da literatura, na qual identificou abordagens e metodologias já estabelecidas e usadas em contextos isolados, as quais poderiam impactar positivamente no desenvolvimento de aspectos específicos necessários para um melhor entendimento da caracterização do caso em estudo, da formulação e da solução e implementação prática.

Assim sendo, as quatro primeiras etapas tratam da caracterização do caso em estudo. Elas se assemelham no que concerne à busca de informações iniciais e caracterização do problema e sistema em análise. Além disso, funcionam de forma complementar, cada etapa prover informações e auxilia no desenvolvimento da seguinte. Da quinta à nona etapa, os aspectos de formulação do modelo e obtenção e análise dos dados necessários são abordados. Por fim, as últimas duas etapas tratam de estratégias para a solução do problema e efetiva implementação prática. Os subtópicos apresentados em seguida esclarecem como cada etapa deve ser desenvolvida.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CASO EM ESTUDO

Esta seção trata da caracterização de um possível caso que será estudado por meio da aplicação da metodologia.

3.1.1 Etapa 1: Entendimento do processo

A primeira etapa da metodologia proposta para a modelagem matemática da manutenção consiste em entender o funcionamento do processo ao qual a atividade de manutenção está relacionada. Ela é importante porque existem muitas possibilidades de funcionamento de sistema de produção e a caracterização de como ele de fato funciona e de como as máquinas e demais equipamentos operam se faz necessária para ter uma visão geral sobre funcionamento e comportamento dos elementos do sistema em análise.

Nesse sentido, mesmo quando o interesse da modelagem é relacionado com um determinado setor ou com um conjunto de máquinas, máquina ou componente específicos, deve-se entender e caracterizar porque este elemento de análise é o crítico para o sistema em estudo, implicando assim, no desenvolvimento de uma modelagem que proponha resolver um determinado problema específico com base no comportamento do sistema analisado. Para tanto, o entendimento do processo é o aspecto base para o desenvolvimento de análises da situação atual.

Assim sendo, nesta etapa busca-se entender como acontece o funcionamento do processo para que se comece a obter informações que tenham condições de apontar, de forma inicial, a definição do problema que será analisado. É importante mencionar que a estruturação desenvolvida nesta etapa e nas três seguintes também contribui para o desenvolvimento de estudos de caso relacionados com a manutenção.

Nestes estudos, mesmo que uma modelagem não seja definida e aplicada, o conjunto de informações e análises pode contribuir para a identificação de problemas e oportunidades de

melhoria em manutenção, sob a perspectiva operacional. Dentro do contexto proposto nesta dissertação, o entendimento do processo em análise pode ser estabelecido a partir da caracterização dos pontos descritos no Quadro 5. No que concerne à perspectiva estratégica, Santos e Cavalcante (2018b) tercem algumas considerações por meio da integração de algumas metodologias. Além disso, um questionário para levantamento de questões importantes para a caracterização do processo de produção e do aspecto gerencial da manutenção é sugerido para obter a contextualização inicial para o entendimento do processo requerido nesta etapa – Questionário para Gestor da Manutenção (Apêndice A).

Quadro 5 – Etapa 1: entendimento do processo

ETAPA 1 – Entendimento do processo
1.1 Determinação do fluxo do processo
- Definição das etapas do processo de produção e suas respectivas descrições
- Identificação de gargalos, efeitos de *buffers*, etc.
- Definição de equipamentos críticos para o processo
- Atividades manuais críticas
1.2 Identificação da taxa de produção
- Identificação das etapas com baixa eficiência e produtividade
- Identificação de fatores inibidores de desempenho
- Indisponibilidade, taxa de retrabalho, número de itens fora do padrão, etc.
1.3 Número de turnos e Nível de variedade (alto, médio e baixo)
1.4 Particularidades
- Regime de funcionamento
- Tipo de atendimento ao cliente (por estoque ou produção)
- Nível de regularidade da demanda (verificação de sazonalidade na demanda)
1.5 Caracterização do sistema de produção (lote, massa, contínua, etc.)
1.6 Riscos inerentes ao processo (ambiental, humano, capital, etc.)
1.7 Nível de agressão ao sistema durante o seu próprio funcionamento
- Suspensão de pó ou partículas abrasivas; níveis de corrosão, temperaturas e umidade elevados? Irregularidade em fonte energética (tensão de entrada)
1.8 Outros aspectos específicos do processo

Fonte: O autor (2019)

As informações levantadas devem servir como base para a identificação de problemas no processo que possivelmente são relacionados com a manutenção ou possam influenciar substancialmente a demanda pelos recursos de manutenção, uma vez que podem caracterizar mais falhas ou exigir maior intensidade da realização de ações para prevenir as falhas. Dado que as vulnerabilidades do processo são caracterizadas de forma mais geral, a abordagem *snapshot* aliada a outras ferramentas de identificação de problemas, pode contribuir para a análise mais minuciosa de fatores que impactam negativamente no processo por conta de alguma falha ou ineficiência relacionada com a manutenção.

3.1.2 Etapa 2: Abordagem *snapshot*

A abordagem *snapshot* é uma forma de identificar e reconhecer a natureza dos problemas em manutenção, por meio da análise da causa, consequência e meios de prevenção das falhas (CHRISTER; WHITELAW, 1983). Esta abordagem é estruturada, dentro da metodologia proposta, de forma a traçar uma imagem clara dos aspectos que se relacionam com a manutenção. Nesse sentido, as sete perguntas da Manutenção Centrada em Confiabilidade (*Reliability-Centred Maintenance - RCM*), estabelecidas por Moubray (1997), também são utilizadas para a caracterização da manutenção, por estarem totalmente relacionadas com a investigação proposta pela abordagem *snapshot*.

Uma característica importante desta etapa é que a partir da inclusão da abordagem *snapshot* na metodologia, pode-se vislumbrar alguns elementos fundamentais para a caracterização do sistema a ser modelado. Por exemplo, a caracterização quanto ao número de componentes a ser considerado no sistema (a depender da característica das falhas, estabelecida no *snapshot*), inserção ou não da possibilidade de erro humano, detecção de características como desgaste e envelhecimento (o que pode direcionar para um tipo de modelagem *delay time*), etc.

Além disso, pode-se voltar a esta etapa quando o desenvolvimento de modelagens necessite de informações mais específicas, muitas vezes subjetivas, para o levantamento de dados, determinação de parâmetros e validação do modelo. Assim, a abordagem *snapshot*, no contexto da metodologia proposta nesta dissertação, pode contribuir tanto para a caracterização da manutenção quanto para o efetivo desenvolvimento de modelos, por meio do estabelecimento de particularidades que servem desde o levantamento de hipóteses, até a estimação de parâmetros. O Quadro 6 mostra como a abordagem *snapshot* pode ser estabelecida.

A abordagem *snapshot*, descrita no Quadro 6, agrega as características de falha e de operacionalização da manutenção ao conhecimento previamente obtido sobre o processo. Algumas das informações sobre a abordagem *snapshot* podem ser obtidas diretamente com o operador de manutenção, através do Questionário para Operador de Manutenção (Apêndice B).

A análise criteriosa das informações advindas das duas primeiras etapas da metodologia proposta serve como ponto de partida para a identificação e caracterização de problemas relacionados com a manutenção. Estes problemas podem ser agrupados e classificados em um conjunto de melhorias em potenciais, das quais pode-se eleger qual tem maior prioridade de solução, de acordo com o critério estabelecido pela empresa. A estruturação deste procedimento para a definição do problema a ser abordado é desenvolvida na etapa 3.

Quadro 6 – Etapa 2: abordagem snapshot

ETAPA 2 – Abordagem *snapshot*
2.1 Identificação da equipe de mantenedores (nome, formação, tempo de experiência)
2.2 Identificação das funções e padrões de desempenho dos equipamentos
2.3 Avaliação das falhas (por: *snapshot* e perguntas RCM adaptadas)
- Como o equipamento falha em cumprir sua missão (descrição detalhada)
- Natureza da falha (elétrica, mecânica, hidráulica, pneumática, etc.)
- Causa da falha (desgaste, erro do operador, lubrificação, projeto do componente, corpo estranho, excesso de vibração, utilização acima da capacidade, configuração incorreta)
- De que modo ocorre cada falha (descrição detalhada)
- Consequências da falha (perda material, parada no processo, retrabalho, etc)
- Meios de prevenção (nenhum, substituição, re-projeto de componente, melhoria na prática do operador, etc.)
- Determinação inicial do HLA (há quanto tempo o surgimento da falha poderia ser detectado)
2.4 Caracterização das formas de manutenção atuais (corretiva, preventica, preditiva, etc.)
2.5 Estruturação dos dados obtidos em forma de gráficos
2.6 Indicação dos aspectos críticos relacionados com a manutenção

Fonte: O autor (2019)

3.1.3 Etapa 3: Definição do problema

A definição correta do problema a ser modelado é uma das partes mais críticas para o processo de modelagem, pois todo o desenvolvimento do modelo é realizado de forma a propor uma solução adequada para o problema específico que foi definido.

Dentro da metodologia proposta nesta dissertação, a definição do problema ocorre depois do levantamento e análise de uma quantidade relevante de informações sobre o processo e sobre a caracterização da manutenção. Isto é importante para evitar que um problema possa ser definido apenas com base em uma situação desagradável que é recorrente, porém tratada de forma superficial. Esta situação deve sim ser levada em consideração, mas todo o contexto relacionado a ela também é relevante e deve ser igualmente considerado. As etapas anteriores tratam dessa consideração e apontam um indicativo mais consolidado para a identificação dos problemas do sistema e seus aspectos relevantes.

Desse modo, a definição do problema deve considerar os aspectos que levam a uma situação que não é aceitável, que geram custos, indisponibilidade, risco, etc. Esses aspectos e situações podem se relacionar com particularidades do processo ou com a estruturação e organização da manutenção, por isso que tanto o processo produtivo, suas características gerais e específicas, quanto as atividades cotidianas relacionadas com a manutenção são previamente estudados, analisando-se o porquê das coisas, seus impactos e necessidades de melhoria.

Levando-se em consideração que as etapas anteriores já foram postas em prática, esta etapa utiliza-se das informações e análises previamente realizadas para definir o problema a ser modelado e apontar suas características básicas. Nesse sentido, o Quadro 7 expõe como a etapa de definição do problema pode ser estruturada.

Quadro 7 – Etapa 3: definição do problema

ETAPA 3 – Definição do problema
3.1 Listagem das situações inaceitáveis para o funcionamento do sistema
3.2 Definição dos aspectos relacionados com todas as situações inaceitáveis
3.3 Essas situações contribuem para um problema comum e/ou para problemas distintos?
3.4 Identificação de aspectos em comum para a disseminação de problemas similares
3.5 Identificação de problemas específicos que podem ser modelados matematicamente
3.6 Priorização do problema ao qual a solução traz maior benefício
3.7 Atribuição inicial das características gerais relacionadas com o problema
3.8 Definição formal do problema, do impacto causado por ele e da necessidade de resolução

Fonte: O autor (2019)

Após o entendimento das situações problemáticas, seus aspectos promotores e como cada uma caracteriza a presença de problemas no sistema em análise, caracteriza-se o sistema sob a perspectiva do problema definido.

3.1.4 Etapa 4: Caracterização do sistema

A etapa de caracterização finaliza a parte de entendimento inicial do sistema e resume os aspectos que devem ser levados em consideração para o desenvolvimento da modelagem. Nesta etapa, o sistema que deverá ser modelado é caracterizado a partir das particularidades do problema a ser solucionado e das interferências que contribuem para a existência do problema.

A caracterização do sistema está diretamente relacionada com a etapa seguinte que trata da seleção do modelo de formulação. Nessas duas etapas, tem-se que levar em consideração a relação realidade-modelo. Em outras palavras, deve-se estruturar uma caracterização que posteriormente permita indicar o quão próximo o modelo está da realidade prática. Para tanto, é importante que todas as características sejam minuciosamente descritas e que somente simplificações essencialmente necessárias sejam realizadas. Nesse sentido, devem ser indicadas as características que devem estritamente estar incluídas na modelagem e aquelas que podem ser desconsideradas com base em algumas justificativas plausíveis.

A caracterização do sistema deve ser a mais completa possível, de forma que o modelo possa englobar todas as complexidades existentes na realidade, se assim for requerido.

Entretanto, isto não significa que o modelo a ser desenvolvido deva ser excessivamente complexo. Ele não pode ser muito complexo a ponto de ser difícil de aplicar na prática mas também não pode ser tão simples a ponto de não ser uma representação adequada da realidade. Esta etapa deve, portanto, prover todas as características necessárias para que a formulação matemática seja iniciada, independentemente de uma abordagem mais complexa ou simples do caso em estudo. O Quadro 8 indica como a caracterização do sistema pode ser realizada e quais aspectos devem ser considerados.

Quadro 8 – Etapa 4: caracterização do sistema

ETAPA 4 – Caracterização do sistema
4.1 Detalhamento do nível de complexidade em termos de equipamentos e componentes
4.2 Caracterização do nível de performance atual e esperado
4.3 Descrição detalhada do funcionamento e modo de falha do(s) equipamento(s)
4.4 Descrição do nível de possibilidade de erro humano
4.5 Determinação de fatores caracterizados por incerteza
4.6 Estruturação da abordagem de modelagem (componente simples ou complexo)
4.7 Definição do número de estágios possíveis para o(s) equipamento(s) analisado(s)
4.8 Definição de características essenciais ao modelo
4.9 Definição e justificativa de características simplificáveis
4.10 Determinação de demais fatores específicos
4.11 Determinação das hipóteses que devem guiar o desenvolvimento da modelagem

Fonte: O autor (2019)

Como pode-se perceber, esta etapa deve resumir todas as informações necessárias para o início da modelagem matemática. Apesar das informações serem apresentadas nesta etapa de forma mais simples e direta, deve-se ter um nível de profundidade que garanta a formulação do modelo sem que seja necessária a recorrente análise das informações geradas nas etapas anteriores.

As informações dispostas nesta etapa servem como uma espécie de resultado consolidado do conjunto de etapas referentes à caracterização do caso em estudo. Essa estruturação foi pensada para facilitar e agilizar o processo de modelagem que se inicia em seguida e conta com um nível de informação necessário para o desenvolvimento de um modelo que esteja em consonância com a realidade.

3.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A formulação matemática é iniciada tendo como *input* as informações consolidadas geradas pelo processo de caracterização do caso em estudo. Esta série de etapas engloba desde a seleção do modelo de formulação até questões de validação e análise do modelo elaborado.

3.2.1 Etapa 5: Seleção do modelo de formulação

A seleção do modelo de formulação delineia a estrutura básica que a modelagem deve seguir. Em conjunto com a caracterização do sistema, ela aponta a direção para o desenvolvimento do modelo. As informações da etapa anterior servem como base para a escolha do modelo de formulação.

A escolha do tipo de abordagem e formulação matemática que será empregada pode ser inicialmente definida de acordo com a caracterização explicada no tópico 2.1.4, que mostra uma classificação genérica de políticas de manutenção, organizada por Pintelon e Parodi-Herz (2008), e a caracterização de alguns tipos de modelos, por Cavalcante (2005). O Quadro 9 mostra algumas características que podem levar à seleção de um modelo de formulação.

Quadro 9 – Etapa 5: seleção de modelo de formulação

ETAPA 5 – Seleção de modelo de formulação
5.1 Definição de atuação do sistema em análise
- Em operação
- Em prontidão
5.2 Caracterização da política que melhor representa o sistema em análise
- Baseada em: falhas, tempo de utilização, condição, oportunidade ou em projeto
5.3 Caracterização da abordagem de atuação da manutenção (baseada em 5.2)
- Preventivamente (substituição programada independente do estado, etc)
- Preditivamente (substituição, reparo em defeito, etc – por acompanhamento da condição)
5.4 Caracterização da abordagem do sistema em análise (baseada em 4.6)
- Análise e modelagem de componente único
- Análise e modelagem de sistema complexo
5.5 Definição do número de estágios (bom, defeituoso, falho, etc.) (baseada em 4.7)
5.6 Caracterização de abordagem determinística ou probabilística (baseada em 5.2)
5.7 Identificação de modelagens específicas que possam ser aplicadas ao caso
- Entendimento do tipo de consideração realizada para a modelagem
- Identificação dos parâmetros considerados na literatura
- Verificação da possibilidade de reformulação para aplicação ao caso em estudo
5.8 Determinação do tipo de modelagem a ser utilizada

Fonte: O autor (2019)

Dadas as hipóteses norteadoras da modelagem e também o tipo de modelagem que será empregada, passa-se à etapa de levantamento de dados, a qual deverá fornecer dados objetivos e/ou subjetivos que permitam a posterior estimação dos parâmetros a serem utilizados no modelo.

3.2.2 Etapa 6: Levantamento de dados

Esta etapa identifica os dados necessários para uso na formulação, coleta-os e estabelece como eles podem servir para a explicação do fenômeno estudado. O estabelecimento dos dados necessários é realizado de acordo com as hipóteses do modelo, com a caracterização do sistema e com o tipo de modelagem que será empregada.

É importante ressaltar que pode existir grande variação entre o tipo de dado a ser coletado, de acordo com o modelo em que se está trabalhando. Nesse sentido, alguns dados podem ser muito relevantes em um tipo de modelagem e negligenciados em outros tipos. Esta etapa visa dar um direcionamento de como a identificação dos dados relevantes pode ser definida e como a coleta pode ser posteriormente realizada.

De forma geral, os dados podem ser de natureza objetiva e subjetiva. No primeiro caso, existem formas de mensurar os valores relacionados ao dado sem que se necessite algum tipo de interferência subjetiva humana. No segundo caso, necessita-se de um conhecimento técnico e/ou operacional de um especialista para que, a partir dele, os dados possam ser definidos e posteriormente tratados de forma a remover possíveis vieses.

Esses dois tipos de dados são importantes, sendo que a forma de se trabalhar com cada um deles é distinta. À título de ilustração, o trabalho de Wang (2008) mostra como cada abordagem pode ser aplicada no contexto da modelagem *delay time*. Em linhas gerais, a abordagem subjetiva é realizada quando dados objetivos não estão disponíveis em quantidade e qualidade suficientes para futura estimação dos parâmetros, fato comum em países em desenvolvimento, como o Brasil (SCARF, 1997; DESA; CHRISTER, 2001; WANG, 2008).

Dada esta contextualização inicial sobre a função dessa etapa dentro da metodologia, convém abordar com maior detalhamento um tipo de dado essencial para a formulação dos modelos em manutenção, sobretudo no contexto de manutenções preventivas: os tempos relacionados com a manutenção.

Nesse sentido, Goldman e Slattery (1964) definem os principais tempos relacionados com as atividades de manutenção, descritos em seguida:

- **Tempo ativo de manutenção** (*active maintenance time*): tempo no qual o trabalho de uma manutenção planejada ou corretiva é realmente gasto no item.

- **Tempo não ativo de manutenção** (*nonactive maintenance time*): tempo no qual a manutenção não está sendo realizada no item devido a razões administrativas.
- **Tempo ativo de reparo** (*active repair time*): tempo no qual um ou mais técnicos estão trabalhando no item para realizar o reparo.
- **Tempo administrativo** (*administrative time*): tempo de manutenção não ativo (não gasto no reparo do equipamente efetivamente, mas nas tarefas administrativas para viabilizar o reparo).
- **Tempo de alerta** (*alert time*): tempo necessário para que um recurso esteja disponível para executar uma missão.
- **Tempo calendário** (c*alendar time*): o número total de dias ou horas em um período de observação designado.
- **Tempo de demanda pelo equipamento** (*demand usage time*): o número total de dias por mês, horas por dia, etc., em que se requer que um equipamento esteja operacional.
- **Tempo de correção da falha** (*fault correction time*): o tempo necessário para que uma atividade de manutenção específica corrija um mal funcionamento.
- **Tempo de localização da falha** (*fault location time*): tempo necessário para localizar o elemento falho.
- **Tempo de ajuste final** (*final test time*): tempo de ajustes e calibração necessários para o equipamento voltar a funcionar depois de um reparo.
- **Tempo inativo** (*inactive time*): período de tempo em que um item está disponível mas sua utilização não é requerida ou quando o item não está operacional para sua devida utilização.
- **Tempo de obtenção de materiais** (*item-procurement time*): tempo necessário para obter os itens materiais necessários para executar o reparo.
- **Tempo de missão** (*mission time*): tempo no qual um item deve executar uma missão específica.
- **Tempo médio para reparo** (*mean-time-to-repair*): tempo ativo de manutenção em um determinado período dividido pelo numero total de intervenções no mesmo período.
- **Tempo de preparação** (*preparation time*): tempo necessário para se obter os equipamentos e manuais de manutenção e de configurar os instrumentos necessários para a localização das falhas.
- **Tempo de reação** (*reaction time*): tempo necessário para iniciar uma missão de manutenção, desde que a ordem de iniciação do serviço é recebida.
- ***Ready time***: período de tempo durante uma missão, no qual um item está disponível para operação, mas não é requerido (diferente de tempo de alerta).

- **Tempo de estoque ou suprimento** (*supply time*): parcela do tempo da manutenção não ativa no qual a manutenção é atrasada porque um item necessário não está disponível.
- **Tempo de atraso técnico** (*technical delay time*): número de horas gasto em manutenção enquanto nenhuma tarefa de manutenção é realizada por conta de falta de suprimentos ou razões administrativas.
- ***Total technician time***: A quantidade total de homem-hora necessária para completar as tarefas de manutenção.

Cada tempo específico pode ter maior ou menor importância dentro de determinado contexto de estudo da manutenção e as definições acima esclarecem como diferentes formas de caracterização podem ser utilizadas. Dado essa contextualização sobre os diferentes tempos em manutenção, e esclarecendo, ainda, que a parte de estimação é abordada na etapa 8, após a formulação do modelo, o Quadro 10 indica o passo a passo para o levantamento dos dados. Ressalta-se que os tipos de dados mostrados na etapa 6.1 servem apenas como exemplos por serem amplamente requeridos em uma vasta quantidade de modelos de manutenção.

Quadro 10 – Etapa 6: levantamento de dados

ETAPA 6 – Levantamento de dados
6.1 Identificação dos dados relevantes
- Tempo de inatividade (devido à falha, à inspeção, etc.)
- Custos de manutenção (inspeção, falha, em estado defeituoso, reparo, etc.)
- Taxa de chegada de defeitos
- Taxa de falha
- Tempo até a falha
- Tempo entre falhas
- Nível de dispersão ou concentração dos dispositivos que compõe o sistema
- Outros
6.2 Caracterização de acordo com a natureza do dado
- Objetivos
- Subjetivos
6.3 Definição de estratégia de coleta de acordo com a natureza
- Objetivos (equipamentos, softwares, planilhas, *database* a serem analisados)
- Subjetivos (questionários, entrevistas, etc.)
6.4 Identificação do dado e sua respectiva fonte e forma de coleta
6.5 Coleta, agregação, análise inicial e classificação dos dados
- Dados para estimação dos parâmetros
- Dados para validação (ver etapa 9)
6.6 Armazenamento de todos os dados importantes para utilização no modelo e estimação dos parâmetros

Fonte: O autor (2019)

A identificação, coleta, classificação e armazenamento dos dados relevantes são essenciais para se ter uma organização bem definida dos dados que serão utilizados na aplicação prática da modelagem, bem como na estimação de parâmetros para uso no modelo. Nesse sentido, um ponto crucial relacionado com a presente etapa é a acessibilidade às informações relevantes para a formulação e desenvolvimento da modelagem.

3.2.3 Etapa 7: (Re)Formulação matemática

A formulação do modelo deve ser realizada de forma a conceber matematicamente as características do sistema em análise que foram anteriormente levantadas e definidas como importantes para a representação do caso em estudo. Com base nas hipóteses, na caracterização do sistema e nos dados levantados, deve-se determinar os parâmetros do modelo, as variáveis envolvidas, o objetivo a ser alcançado (maximização ou minimização), as restrições e o comportamento do sistema.

Nesta etapa, antes de começar a formulação, é importante verificar se já existem modelos que abordam o tipo de problema a ser resolvido, pois o estudo desses modelos permite a verificação da possibilidade de utilização deles, podendo contribuir para o entendimento do aspecto matemático, e ajudar a direcionar a estruturação e desenvolvimento do modelo proposto, etc.

Nesse sentido, se já existir na literatura algum modelo previamente descrito que modele o problema, deve-se analisá-lo, verificando a possibilidade de utilização, e/ou adequação por meio de uma reformulação. No caso da necessidade de reformulação, deve-se identificar as características a serem reformuladas, de forma a melhor representar a realidade em estudo. Nesta etapa, pode-se inclusive delinear uma estrutura de comparação entre o modelo já existente e o proposto, permitindo que na etapa de análise do modelo, as potencialidades de cada um possam ser indicadas, por meio de um estudo comparativo.

Um exemplo de reformulação em modelo para melhor representar uma realidade específica, bem como a análise comparativa entre modelo existente e reformulado, é mostrado no próximo capítulo, o qual aborda a possibilidade de se incluir o custo relativo ao tempo de permanência no estado defeituoso para modelos *delay time*. O Quadro 11 ilustra como o processo de formulação matemática pode ser desenvolvido.

Quadro 11 – Etapa 7: (re)formulação matemática

ETAPA 7 – (Re)formulação matemática
7.1 Verificação das hipóteses norteadoras do modelo
7.2 Estudo das características e do comportamento do sistema (baseado nas etapas anteriores)
7.3 Verificação de modelos existentes (de acordo com etapa 5 e 6)
7.4 Indicação da possibilidade de utilização, reformulação e análise comparativa
7.5 Reformulação ou formulação do modelo
- Definição de variáveis e parâmetros
- Definição do(s) objetivo(s) e das restrições
- Modelagem matemática do comportamento do sistema
- Verificação de *tradeoff* entre simplicidade e complexidade, no contexto de representação adequada da realidade e aplicação prática
- Não tão simples que não represente a realidade
- Não tão complexo que não possa ser efetivamente aplicado ao contexto real
7.6 Definição do modelo a ser utilizado
7.7 Estruturação de elementos de análise comparativa entre modelos existentes e proposto

Fonte: O autor (2019)

O estudo do problema, das possíveis formas de modelagem e resolução já existentes na literatura, e a (re)formulação matemática proposta nesta etapa visam garantir que a formulação que está sendo elaborada esteja em consonância tanto com o problema específico a ser tratado, quanto com as abordagens estabelecidas na literatura científica. Isto é importante para evitar que modelagens com baixo nível de representatividade da realidade e/ou baixo rigor científico sejam propostas.

Uma vez que a formulação matemática foi devidamente elaborada, a estimação dos parâmetros utilizados no modelo deve ser realizada, de acordo com o estabelecido na próxima etapa desta metodologia.

3.2.4 Etapa 8: Estimação de parâmetros

Existe uma ampla variedade de formas de estimar parâmetros de modelos a partir das características dos dados obtidos. Assim, esta etapa deve definir e justificar qual método de estimação será utilizado e como será aplicado. Antes do estabelecimento do passo a passo para estimação dos parâmetros, convém mencionar exemplos de formas de estimação de parâmetros tanto para dados de origem objetiva quanto subjetiva, enfatizando-se este último por requerer a eliminação dos vieses dos respondentes.

No primeiro caso, pode-se estimar os parâmetros por meio da técnica da máxima verossimilhança, amplamente conhecida na teoria da estimação (GERTSBAKH, 2000). No segundo caso, é interessante mostrar algumas considerações sobre a subjetividade dos dados e

formas de eliminação de vieses. Nesse sentido, Wang (1997) propõe um conjunto de etapas que tratam dessas questões com o intuito de viabilizar dados subjetivos mais condizentes com a realidade em análise, no contexto da estimação de parâmetros para modelos *delay time*. Esta metodologia para abordagem subjetiva pode ser resumidamente descrita da seguinte forma:

- **Fase de identificação do problema**: por exemplo, identificação dos principais tipos de falhas e suas possíveis causas.
- **Fase de identificação e escolha dos especialistas**: definição das pessoas que reconhecidamente têm o maior conhecimento sobre o sistema e/ou máquina em análise. Geralmente, não menos que três e não mais que cinco especialistas devem ser selecionados entre técnicos de manutenção e engenheiros relacionados com o sistema.
- **Fase de formulação dos questionamentos**: elaboração dos questionamentos fundamentais para a aquisição dos dados.
- **Fase de elicitação**: realizada individualmente com cada especialista.
- **Fase de calibração**: aponta até que ponto o conjunto de funções de probabilidade corresponde à realidade.
- **Fase de combinação**: combinação das probabilidades estabelecidas, por exemplo, por meio de um método de ponderação, executando uma média ponderada das estimativas de todos os especialistas, ou por meio de outro método que seja conveniente.
- **Fase de atualização**: realização de possíveis ajustes.

Observa-se que caso seja necessária a aplicação da análise acima citada, a metodologia apresentada neste capítulo pode contribuir com o desenvolvimento de muitas fases propostas por Wang (1997) devido a um conhecimento previamente adquirido por meio da aplicação das etapas anteriores dessa metodologia.

Visto este esclarecimento acerca da importância de um procedimento bem definido que caracterize a estimação, com vistas a evitar erros de julgamento no contexto de dados subjetivos, apresenta-se a estruturação da etapa de estimação de parâmetros no Quadro 12.

Quadro 12 – Etapa 8: estimação de parâmetros

ETAPA 8 – Estimação de parâmetros
8.1 Verificação dos dados obtidos na etapa 6
8.2 Separação dos dados objetivos e subjetivos
8.3 Definição e justificativa dos métodos de análise de dados para estimação
8.4 Seguimento dos procedimentos indicados para aplicação dos métodos específicos usados
8.5 Determinação dos valores dos parâmetros do modelo

Fonte: O autor (2019)

A determinação dos valores dos parâmetros finaliza o conjunto de informações necessárias para que o modelo seja aplicado na prática. Após esta etapa, valida-se e analisa-se o modelo para posteriormente propor uma solução e sua implementação prática.

3.2.5 Etapa 9: Validação e análise do modelo

A validação e a análise do modelo são etapas distintas no processo de modelagem matemática para a resolução de problemas reais, descrito por Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016) e apresentado na Figura 1 desta dissertação. No entanto, as informações provenientes da análise matemática do modelo são as que de fato permitem que a validação seja realizada por meio da comparação com os dados especificamente coletados para a validação. Desta forma, a metodologia proposta nesta dissetação une as duas etapas, ao invés de propor que etapas distintas sejam concomitantemente realizadas.

Segundo Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016), a validação analisa se o modelo e os parâmetros estabelecidos são uma boa representação da realidade e podem efetivamente indicar uma solução apropriada para o problema em questão. Entretanto, para fazer uma comparação entre o resultado do modelo e os dados de validação, necessita-se que o modelo tenha sido previamente executado por meio de alguma ferramenta computacional matemática.

Assim, primeiramente analisa-se o modelo, ou seja, determina-se uma solução ou um conjunto de soluções, por meio de métodos analíticos, de simulação, ou ambos. Depois, executa-se um processo de validação, com os dados obtidos para este fim.

Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016) enfatizam que a validação deve utilizar dados diferentes dos anteriormente usados para a estimação dos parâmetros. Os dados para o estabelecimento da validação podem ter sido obtidos na etapa 6.5 desta metodologia, ou serem posteriormente coletados.

Ainda segundo estes autores, no caso de modelos probabilísticos e estocásticos, a validação pode ser realizada por uma série de métodos não-estatísticos ou estatísticos. No primeiro caso, utiliza-se uma comparação gráfica entre dados de validação e resultados do modelo para avaliar visualmente se o ajuste entre os dois é razoável ou não. Depois utiliza-se medidas quantitativas, para análise da adequação do modelo. No segundo caso, testes estatísticos são utilizados para verificar a adequação do ajuste do modelo aos dados.

Uma vez que o modelo final é apresentado, pode-se realizar uma análise de sensibilidade para verificar o efeito de mudança nos resultados, de acordo com algumas variações nos dados de entrada. A análise de sensibilidade é uma forma de se verificar a consistência do modelo por meio da análise do seu comportamento em diferentes situações. Este tipo de análise possibilita

um entendimento mais profundo do comportamento do modelo, indicando, desta forma, se ele está de fato se comportando como esperado.

O Quadro 13 estabelece o passo a passo para a análise e validação do modelo segundo à metodologia proposta nesta dissertação.

Quadro 13 – Etapa 9: análise e validação do modelo

ETAPA 9 – Análise e validação do modelo
9.1 Análise do modelo
- Métodos analíticos
- Simulação
- Ambos
9.2 Determinação de uma solução inicial ou de um conjunto de soluções
9.3 Representação gráfica da solução
9.4 Estabelecimento dos dados de validação
- Recuperação dos dados de validação possivelmente obtidos na etapa 6.5
- Coleta de novos dados para validação (se for o caso)
9.5 Determinação da forma de validação do modelo
- Estatística (Determinar método)
- Não-estatística (Determinar procedimento)
9.6 Seguimento do procedimento específico de validação escolhido
9.7 Determinação de possíveis ajustes
- No modelo (seguir procedimentos usados na etapa 7.5)
- Nos valores dos parâmetros (seguir procedimentos usados na etapa 8.4)
9.8 Análise de sensibilidade e verificação do comportamento do modelo
9.9 (Re)definição do modelo final a ser utilizado

Fonte: O autor (2019)

Como apresentado no Quadro 13, a etapa de análise e validação do modelo possibilita uma estruturação para que os ajustes necessários ao modelo sejam possíveis de serem identificados e executados, de forma a obter um modelo final que indicará a solução do problema em análise. As considerações sobre o estabelecimento da solução, bem como sua implementação prática, são mostradas nas duas últimas etapas da metodologia proposta.

3.3 SOLUÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

A obtenção de uma alternativa ou de um conjunto de alternativas de solução não indica que necessariamente o problema está resolvido. Uma análise cuidadosa dos resultados e das implicações que podem ser causadas por eles deve ser realizada para então propor a solução mais adequada.

A cautela em determinar a solução é importante pois o modelo desenvolvido é uma representação simplificada da realidade, podendo ser mais ou menos representativo de acordo com as hipóteses adotadas. Assim sendo, as etapas finais da presente metodologia tratam de aspectos relacionados com a solução do problema e sua aplicação prática na realidade.

3.3.1 Etapa 10: Solução do problema

A etapa de solução do problema envolve a execução do modelo matemático, formulado e revisado nas etapas anteriores, por meio de uma ferramenta computacional confiável; a análise dos resultados obtidos e seus respectivos impactos na realidade prática; se necessário, a elaboração e justificação de solução de compromisso, indicando os aspectos positivos e negativos relacionados; e a definição da solução definitiva, que representa o passo fundamental para a implementação da solução na prática.

No que concerne à execução do modelo matemático, pode-se utilizar uma ferramenta de resolução de modelos analíticos ou uma ferramenta de simulação a depender de como a modelagem foi elaborada e da acessibilidade às ferramentas computacionais disponíveis. Caso as duas formas de execução possam ser utilizadas, pode-se comparar os resultados como mais uma forma de verificação do modelo.

A análise dos resultados obtidos deve ser realizada de forma a identificar de modo claro os impactos positivos da utilização da modelagem proposta para o contexto real. A comparação do estado atual e do estado futuro, após aplicação da política estabelecida pelo modelo, pode servir para ilustrar o nível de melhoria que pode ser estabelecido.

Nesse sentido, a presente etapa possibilita analisar de forma comparativa os benefícios da utilização de uma modelagem matemática para a solução de um problema real. Ela, de fato, pode apontar o quão benéfico é a aplicação do modelo à realidade específica modelada. Assim, a solução do problema pode ser facilmente verificada em termos comparativos, práticos e quantificáveis

Caso mais de um aspecto esteja sendo analisado na modelagem e objetivos conflitantes estejam presentes no modelo desenvolvido, possíveis soluções de compromisso devem ser indicadas, mostrando-se as potencialidades, as características e a forma de execução de cada uma delas, para que uma análise conjunta com o decisor (o gestor do sistema do caso em estudo) possa ser realizada e finalmente a solução “definitiva” possa ser indicada para implementação prática. O Quadro 14 mostra o passo a passo para a obtenção da solução.

Quadro 14 – Etapa 10: solução do problema

ETAPA 10 – Solução do problema
10.1 Execução do modelo matemático
10.2 Análise dos resultados e impactos
10.3 Elaboração de solução de compromisso (caso necessário)
10.4 Apresentação de possível solução ao gestor do sistema em análise
10.5 Definição da solução definitiva

Fonte: O autor (2019)

A solução do problema e a posterior indicação da solução definitiva, finaliza o trabalho das questões relacionadas com identificação de problema, apresentação de modelagem e definição de solução. Entretanto, é na implementação prática da solução na realidade que o modelo elaborado proporcionará contribuições efetivas. A implementação da solução é descrita na última etapa desta metodologia.

3.3.2 Etapa 11: Implementação da solução

A implementação da solução deve considerar todo o contexto que caracteriza o processo produtivo, a organização do sistema em análise, a estruturação da função manutenção na empresa e a cultura organizacional, pois uma variedade de fatores podem influenciar tanto positiva quanto negativamente na implementação da solução, sobretudo quando a implementação necessita de mudanças no processo ou na organização da manutenção.

À título de ilustração, Phogat e Gupta (2017) identificam, com base em uma ampla revisão da literatura, 11 problemas relacionados com a implementação efetiva da manutenção nas empresas. Esses problemas têm diversas origens e se relacionam com os aspectos técnico, humano, cultural, econômico, e de comunicação. Deste modo, quando uma mudança na forma de atuação da manutenção em determinado sistema é sugerida, necessita-se cautela para que potenciais problemas não se desenvolvam.

Nesse sentido, a caracterização do processo e sistema realizada em etapas anteriores é essencial para o entendimento dos padrões os quais a atividade de manutenção é estabelecida. Verificado este ponto, é fundamental que aconteça um esclarecimento sobre os novos procedimentos e se necessário uma etapa de testes e preparação com o intuito de garantir que a proposta de atuação no sistema de manutenção seja executada conforme definido no modelo, e que a possibilidade de erros humanos na execução seja reduzida.

Isto é particularmente importante para casos em que os modelos indiquem uma frequência maior de manutenção preventiva, por exemplo, substituição preventiva de algum componente. Neste caso, a maior frequência da influência humana no sistema pode acarretar em situações

não previamente consideradas no desenvolvimento do modelo, levando, consequentemente, a uma situação pior que a anterior (BERRADE, CAVALCANTE, SCARF, 2012; BERRADE; SCARF; CAVALCANTE, 2017; ALBERTI et al., 2018).

Visto a importância desta etapa para que as possibilidades de implicações positivas apontadas pelo modelo se replique efetivamente na prática, e situações adversas não esperadas não ocorram, o Quadro 15 estrutura o passo a passo de implementação, considerando importantes aspectos de gerenciamento da manutenção.

Quadro 15 – Etapa 11: implementação da solução

ETAPA 11 – Implementação da solução
11.1 Identificação da solução definitiva
11.2 Análise da viabilidade de implementação prática
11.3 Estruturação de cronograma para implementação
11.4 Definição das estratégias iniciais de implementação
- Verificação de aspectos técnico, cultural, econômico e de comunicação
11.5 Apresentação da implementação à equipe de manutenção
11.6 Treinamento de execução de atividades novas ou mais frequentes
11.7 Monitoramento de fase inicial de implementação
11.8 Verificação dos resultados inicialmente obtidos
11.9 Validação definitiva da implementação da política modelada
11.10 Verificação constante de oportunidade de melhorias

Fonte: O autor (2019)

A implementação da solução e o acompanhamento dos resultados práticos obtidos finaliza a metodologia de modelagem em manutenção proposta por esta dissertação. Como visto, essa metodologia visa garantir que todos os aspectos relacionados com possíveis problemas em manutenção sejam levados em consideração para o desenvolvimento da modelagem e que o modelo possibilite uma aplicação prática que efetivamente garanta melhores resultados em manutenção.

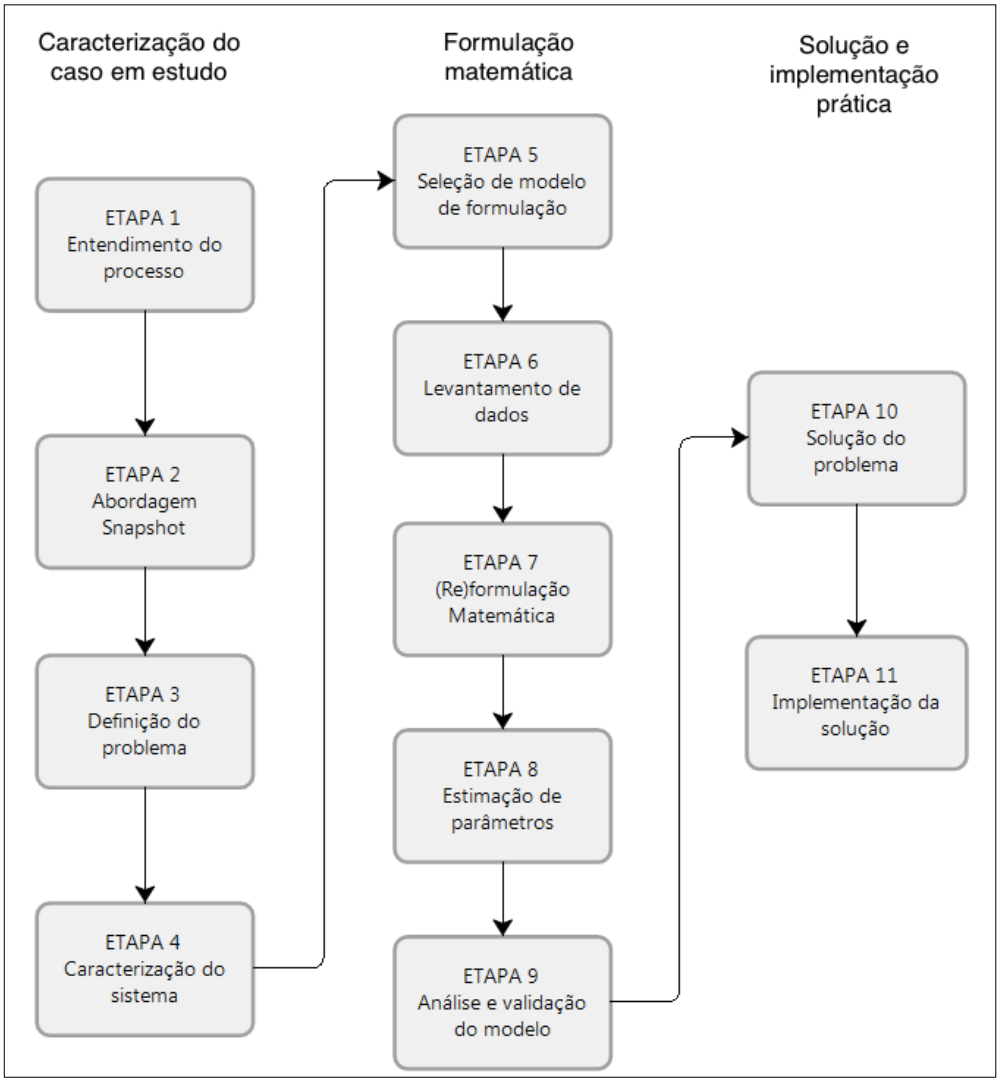
A próxima seção ilustra como esta metodologia pode ser visualizada por meio de um *framework*. Em seguida, as considerações finais sobre a metodologia proposta são apresentadas, assim como o *insight* motivador das modificações em modelos *delay time* propostas no próximo capítulo deste dissertação.

3.4 *FRAMEWORK*

O passo a passo contendo as etapas estabelecidas pela metodologia proposta neste capítulo é apresentado no *framework* descrito na Figura 13. Como pode-se perceber, as etapas

são desenvolvidas ao longo de fases distintas: caracterização do estudo, formulação matemática e, solução e implementação prática.

Figura 13 – Framework da metodologia proposta



Fonte: O autor (2019)

Devido à possibilidade de abordar três aspectos distintos, esta metodologia pode ser utilizada para contextos em que se necessite identificar os problemas em manutenção e posteriormente elaborar um modelo que possibilite melhorias, ou servir para a análise de aspectos específicos por meio do desenvolvimento de uma etapa particular. Esta possibilidade de atuação em diferentes aspectos, permite que a metodologia seja utilizada não somente no contexto da modelagem, mas também da estruturação de estudos de caso em manutenção, sobretudo por meio do desenvolvimento das quatro primeiras etapas.

3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA

A metodologia proposta contribui para a identificação, caracterização, formulação e solução de problemas em manutenção, possibilitando o desenvolvimento de uma modelagem e implementação de uma política consistente com a situação prática de um determinado caso particular. Além disso, devido a sua abrangência, ela pode servir para guiar o desenvolvimento de estudos específicos que tratem de algum aspecto abordado em alguma das etapas.

No que concerne à fase inicial, caracterização do caso em estudo, a inclusão do entendimento do processo e da abordagem *snapshot* como etapas iniciais possibilita que o problema a ser modelado seja definido com maior nível de entendimento sobre os aspectos que de fato afetam negativamente a atividade de manutenção. Além disso, a definição mais apropriada do problema e a posterior caracterização do sistema, podem servir para a estruturação de estudos de casos em manutenção, com vistas ao melhor entendimento desta função que hoje se mostra tão competitivamente relevante.

Em se tratando da fase de formulação matemática, a metodologia contribui para que a formulação ou reformulação de modelos existentes seja desenvolvida por meio de uma estruturação que auxilia na obtenção dos dados necessários e no desenvolvimento de um modelo que possa espelhar a realidade prática de forma satisfatória. Além disso, possibilita-se um passo a passo para que o modelo seja devidamente analisado, validado e cuidadosamente testado antes de ser utilizado para propor algum tipo de solução definitiva.

Por fim, a fase de solução e implementação possibilita que a solução proposta possa de fato ser aplicada na prática e que melhorias possam ser estabelecidas. Nesse sentido, a consideração do planejamento estruturado da execução da solução na prática, por meio de estratégias de gestão e treinamento de pessoal, é essencial para que a teoria seja aplicada à prática de modo a produzir resultados satisfatórios.

Posto essas considerações, o próximo capítulo exemplifica como a parte central da presente metodologia, (re)formulação de modelo, pode permitir a extenção da aplicação de um modelo consolidado a um contexto anteriormente não abordado. Ele não visa executar o passo a passo da metodologia, até porque não se teve acesso a um caso prático. No entanto, mostra como modificações em modelos a partir de contextos reais podem contribuir para melhor representação da realidade. Nesse sentido, o próximo tópico esclarece sobre o *insight* motivador das modificações propostas em modelos *delay time*.

3.6 *INSIGHT* PARA MODIFICAÇÕES EM MODELOS *DELAY TIME*

Apesar de não se ter acesso a um contexto prático para a aplicação da metodologia e possivelmente desenvolvimento de um modelo de manutenção, uma visita a uma empresa de fabricação de aço no estado de Pernambuco possibilitou um insight para a remodelação de um modelo tradicionalmente utilizado (*delay time model*).

O *insight* advém do comportamento de um equipamento muito utilizado nesse tipo de fábrica, a qual precisa executar a trituração do material metálico para que ele seja inserido no processo de produção. Dessa forma, o equipamento triturador, denominado Shredder, formado por martelos fixos distribuídos em um rotor horizontal, é utilizado com o objetivo de reduzir o tamanho da sucata metálica até uma determinada dimensão.

As falhas nos martelos danificam o equipamento, aumentam o custo de substituições, acarretam em uma redução da produtividade da estação de trabalho, entre outros aspectos negativos. Igualmente, os defeitos nos martelos reduzem a capacidade de corte na sucata, diminuindo a capacidade de produção por conta da redução em sua eficiência.

Como esse componente se deteriora ao longo do tempo e permanece um período de tempo em estado defeituoso antes de falhar, seu processo de deterioração e falha pode ser modelado conforme o conceito de *delay time.* Entretanto, o tempo de permanência em estado defeituoso pode contribui de forma negativa para o processo de restauração e reutilização do item, de forma que quanto mais tempo nesse estado, maior o esforço de reparação para recolocar o item no processo e também maior a influencia negativa do item defeituoso no desempenho do equipamento, por conta da redução de sua eficiência.

Assim, esse caso particular mostra que em alguns tipos de situações, é conveniente associar um custo relativo ao estado defeituoso ao modelo *delay time*, de forma que este custo possa traduzir o inconveniente de se manter o sistema operando nessa condição. No próximo capítulo, o *shredder* é melhor caracterizado em termos de sua operação e também é associado a dois contextos de aplicação para os modelos *delay time* com inserção do custo em estado defeituoso.

Com base nessa perspectiva, a influência do tempo em estado defeituoso no custo de manutenção em modelos *delay time* é aprofundada no capítulo seguinte, o qual propõe modificações para modelos *delay time* para componente simples e para sistema multicomponente.

3.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a proposta de metodologia para modelagem em manutenção. Nesse sentido, todas as etapas da metodologia foram apresentadas e comentadas. Por fim, definiu-se um *framework* para o processo de modelagem da manutenção e comentou-se sobre o *insight* que contribuiu para propostas de modificações na modelagem *delay time*.

4 DELAY TIME: ANÁLISE DO CUSTO EM ESTADO DEFEITUOSO

Este capítulo propõe a inclusão do custo em estado defeituoso em modelos *delay time* para componentes simples e para sistemas multicomponente, previamente apresentados na seção 2.2.4 desta dissertação. A modelagem apresentada neste capítulo parte do princípio que os modelos em manutenção não devem ser tão complexos que dificultem sua aplicação prática e nem tão simples que não representem a realidade.

A associação do tempo em estado defeituoso a um custo específico parte do princípio que à medida em que o tempo nesse estágio aumenta, as consequências negativas associadas à permanência nele também aumentam. Além disso, considera-se que o reparo de um defeito identificado logo após ser iniciado tem um custo menor que o reparo de um defeito iniciado há um tempo consideravelmente maior. A ponderação desse custo pode ser modelada a partir da quantidade de tempo no estado defeituoso.

Neste capítulo, quatro propostas de consideração do estado defeituoso são analisadas. As três primeiras contemplam a modelagem *delay time* para componente simples e a quarta para sistemas multicomponentes. As propostas de modificação são:

- Componente Simples:
  - **Modelo 1**: insere um acréscimo no custo do reparo do defeito em função do tempo em estado defeituoso.
  - **Modelo 2**: insere um acréscimo no custo do reparo do defeito e no custo da falha em função do tempo em estado defeituoso.
  - **Modelo 3**: insere a possibilidade de um decréscimo no custo do reparo do defeito em função do tempo em estado defeituoso.
- Sistema multicomponente:
  - **Modelo 4**: insere um custo associado ao período em estado defeituoso.

O próximo tópico aborda algumas situações e equipamentos em que a consideração de um custo relativo ao estado defeituoso pode possibilitar a modelagem de uma política de manutenção mais condizente com a realidade.

4.1 ESTADO DEFEITUOSO COMO FATOR PREPONDERANTE EM POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO

Este tópico trata de algumas situações e alguns equipamentos nos quais o tempo em estado defeituoso pode interferir no processo de degradação de modo a dificultar o reparo do item ou elevar o custo de permanência neste estado à medida que o tempo passa. Assim, buscou-

se encontrar outros equipamentos que assim como o *Shredder*, brevemente contextualizado no tópico anterior, apresentam características que podem fazer com que a manutenção possa ser melhor modelada com a consideração apontada neste capítulo.

4.1.1 Equipamentos possivelmente modelados por meio dos modelos apresentados

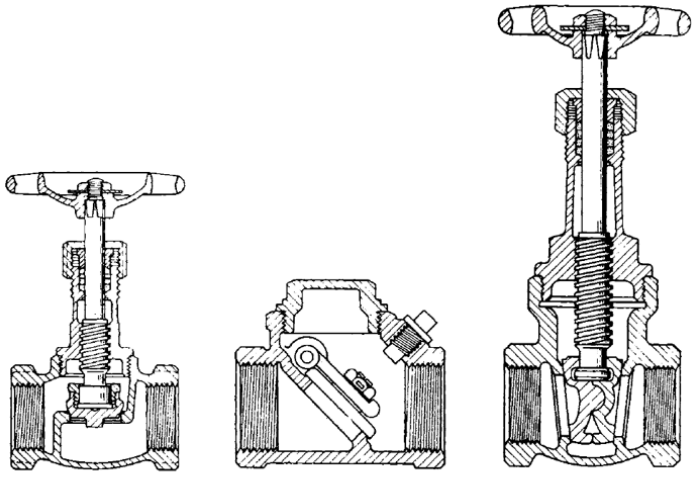
Os equipamentos apresentados nesta seção possuem duas características básicas que *a priori* os caracterizam como uma possibilidade de aplicação da modelagem proposta: o defeito antecede a falha e o custo associado ao estado defeituoso é relevante por representar perdas consideráveis de material e, a depender do contexto, relacionar-se com custos de imagem e ambiental.

4.1.1.1 Válvulas hidráulicas

As válvulas hidráulicas geralmente se desgastam com a utilização, fazendo com que o processo de falha ocorra de forma gradual. Este tipo de equipamento é usado para controlar o fluxo de líquidos. Se uma válvula não fechar corretamente, o fluxo não é reduzido a zero, o que pode ser caracterizado como um defeito. Se uma válvula não funcionar, caracteriza-se a falha (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016).

Entre os modelos básicos de válvula, destacam-se: válvula globo (*globe*), de retenção (*check*), de portão (*gate*) (Figura 14), de bola (*ball*) e de borboleta (*butterfly*) (Figura 15). Todos estes tipos foram desenvolvidos com a ideia de colocar um disco sobre a abertura de um assento, de modo que o fechamento resultante seja apertado e impeça o fluxo do material líquido ou gasoso (HALL, 2008).

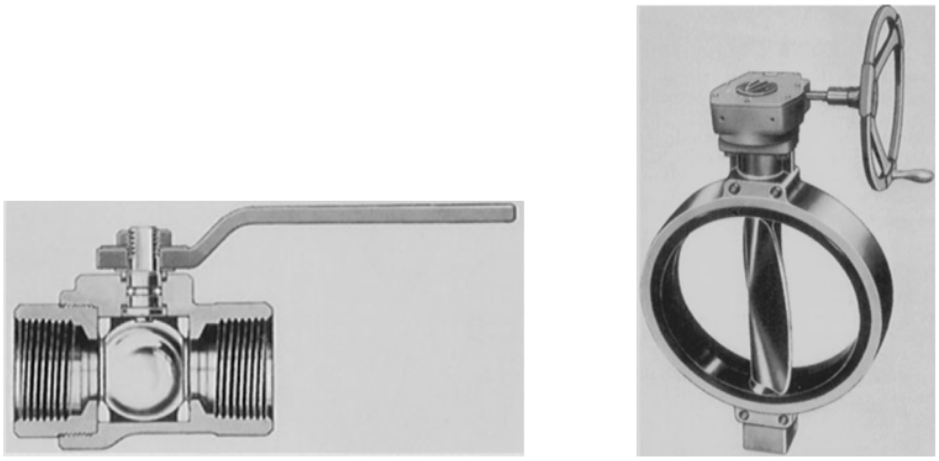
Figura 14 – (a) Válvula globo. (b) Válvula de retenção. (c) Válvula de portão



(a) *(b)* *(c)*

Fonte: Hall (2008, p. 5.198)

Figura 15 – (a) Válvula de bola. (b) Válvula de borboleta



(a) (b)

Fonte: Adaptada de Hall (2008, p. 5.207 e 5.209)

Hall (2008) destaca que após a instalação de uma válvula e durante sua operação, deve-se inspecioná-la periodicamente para garantir que ela tenha um poder de vedação adequado. Além disso, quando ocorre um desgaste e/ou um vazamento, a realização de uma manutenção é necessária para restaurar sua eficiência original.

Dada a possibilidade deste equipamento falhar também de forma gradual, apresentando o estado defeituoso previamente à falha, e considerando a necessidade de inspeção periódica, um modelo para a definição de um período ótimo entre inspeções pode ser elaborado ou definido de acordo com o *delay time*.

Nesse sentido, as modificações apresentadas neste capítulo podem possivelmente ser indicadas como uma alternativa para modelar um período de inspeção ótimo para este tipo de equipamento porque além de levar em consideração que a falha ocorre em dois estados, permitem a inclusão de um custo associado à permanência no estado defeituoso, que no caso das válvulas é uma parcela importante de ser contabilizada.

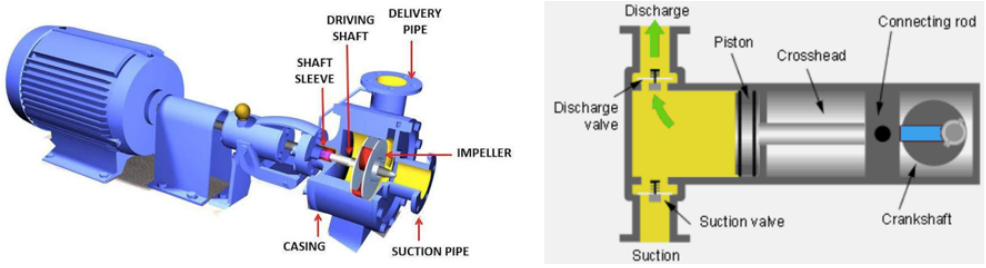
O custo em estado defeituoso é relevante dentro do contexto de manutenção desse equipamento pois a permanência nesse estado resulta em perdas consideráveis. De fato, à medida em que o tempo passa, um volume de líquido é desperdiçado, implicando em: perda material, possíveis desabastecimentos, e até mesmo consequências ambientais catastróficas, a depender do tipo de material presente no sistema.

Assim sendo, as modelagens propostas podem servir como base para a verificação de uma alternativa de modelagem para que a inspeção deste tipo de equipamento seja melhor planejada. Outros exemplos de equipamentos com características semelhantes são apresentados a seguir.

4.1.1.2 Bombas de Sucção

As bombas são projetadas para transferir um determinado volume específico de líquido de uma fonte fixa para um destino final. Elas podem ser caracterizadas como bombas centrífugas (*centrifugal pumps*) (Figura 16a) e bombas de deslocamento positivo (*positive-displacement pumps*) (Figura 16b) (MARCH, 2008).

Figura 16 – (a) Bomba centrífuga. (b) Bomba de deslocamento positivo



(a) *(b)*

Fonte: (a) http://www.mech4study.com/2017/11/centrifugal-pump-principle-parts-types-working-advantages-disadvantages-with-applications.html. (b) https://www.globalpumps.com.au/blog/what-are-the-differences-between-pump-types.

Diferentemente das bombas centrífugas, as bombas de deslocamento positivo são projetadas para deslocar um volume específico de líquido cada vez que completam um ciclo de operação. Apesar dessa diferença central em termos de operação, ambos os tipos têm características em comum como a sensibilidade na variação de alguns parâmetros, como pressão de sucção e mudanças no volume da demanda, e a requisição de um volume de sucção constante para fornecer um fluxo adequado para o processo em operação (MARCH, 2008).

Nesse tipo de equipamento, os componentes que se relacionam com o mecanismo de rotação sofrem maior impacto em termos de desgaste, devido à movimentação mecânica constante, o que implica em perda de eficiência operacional ao longo do tempo. Além disso, os componentes rotacionais funcionam de forma integrada como uma espécie de mecanismo único na qual a falha no mecanismo pode caracterizar um modo de falha.

Dessa forma, sugere-se que o planejamento da manutenção preventiva dessas bombas possa ser uma possível aplicação para as modelagens propostas neste capítulo. Se o sistema rotacional for considerado como componente único que se desgasta com o tempo e interfere nos resultados operacionais ele pode ser modelado pelos modelos 1, 2 ou 3, a depender do tipo de consideração utilizada. Caso ele seja considerado um sistema multicomponente, ele pode ser analisado sob a perspectiva da modelagem apresentada pelo modelo 4. Em ambos os casos,

quanto maior o tempo de permanência no estado defeituoso maior será o impacto negativo no sistema.

4.1.1.3 Tubulações

A tubulação é um componente usado para a transferência de líquido ou gás dentro de um sistema. Este tipo de componente tem uma ampla variedade de aplicação e está presente nas máquinas industriais que necessitam do transporte de determinado fluido para sua efetiva operação. Além disso, a tubulação é um dos componentes mais importantes nos sistemas de abastecimento de água, recolhimento de esgoto, etc.

Dentro do contexto da manutenção desse componente, Hicks (2008) ressalta a importância da consideração de questões relativas à corrosão, ao *layout* do sistema e à interrupção da movimentação do líquido. Outro fator apontado como essencialmente importante é o vazamento, o qual deve ser corrigido o quanto antes.

Pode-se caracterizar um vazamento em uma determinada tubulação como um defeito ou uma falha. Quando, por exemplo, uma rede de distribuição de água tem um determinado vazamento e o fornecimento não é interrompido, mas apenas diminuído, a função de entrega de água por meio da tubulação não deixa de ser executada, caracterizando-se a ocorrência de um defeito que possibilita um decréscimo no nível de eficiência da operação. Quando, porém, o vazamento interrompe o fornecimento de água por inteiro, ocorre a falha, pois a função requerida deixa de ser executada.

A possível aplicação dos modelos propostos ao contexto das tubulações se relaciona com o aspecto do vazamento, desde que se considere que: (*i*) uma tubulação possa estar no estado operacional, defeituoso ou falho; (*ii*) que ela, ou seus trechos críticos, possa ser modelada como um componente único (ver propostas para componente simples) ou como um sistema multicomponente (ver proposta para sistema multicomponente); e principalmente (*iii*) que o custo no estado defeituoso seja um elemento que deve ser levado em consideração na modelagem, sobretudo, em contextos os quais vazamentos costumam durar uma quantidade considerável de tempo, por falha na localização do defeito.

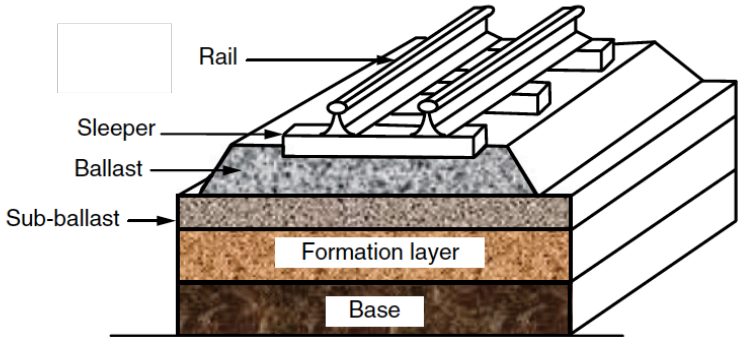
Dentro do contexo de racionamento de água e na conjuntura da aplicação das modelagens proposta ao caso de vazamentos em tubulações, é importante ressaltar que uma abertura indevida ou pontos de vazamentos em tubulações são potenciais habilitadores de contaminação, de forma que quanto maior o tempo nesta condição, maiores serão os esforços para descontaminação da água e/ou eliminação do agente contaminante. Isso caracteriza o tempo em

estado defeituoso e seu respectivo custo associado como fatores preponderantes na determinação de uma política de manutenção de tubulações.

4.1.1.4 Trilhos de ferrovias

Os trilhos são um importante componente do sistema de infraestrutura das ferrovias. De forma geral, eles são estruturados em cima de quatro bases distintas conforme mostra a Figura 17. A deterioração desse componente acontece devido ao desgaste e a fadiga, sendo causados por um conjunto de fatores operacionais (velocidade do trem, carregamento, etc.), de projeto (tipo, tamanho e perfil do material utilizado, etc.) e ambientais (temperatura, condições climáticas adversas, etc.) (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016).

Figura 17 – Estrutura básica de um trilho ferroviário



Fonte: Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016, p. 64)

O trilho se desgasta principalmente por conta do contato com as rodas que correm em sua superfície e também devido ao contato abrasivo com a região a qual está firme, em sua parte inferior. Além disso, corrosões e rachaduras podem surgir ao longo do tempo de operação levando à possível perda de uma determinada seção e à redução da resistência à fadiga (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016). As rachaduras podem ser caracterizadas como um defeito e posteriormente, em uma fase final, como uma falha, à medida em que se inviabiliza a execução de atividade ferroviária.

Assim, a proposta de modelar a manutenção dos trilhos por meio dos modelos propostos se baseia nas características de desgaste desse componente e também na penalidade existente por manter o componente em um estado defeituoso. Essa penalidade se relaciona com o custo de não poder operar o sistema com as características as quais ele foi projetado, tendo-se, por exemplo, que diminuir a velocidade por questões de segurança.

4.1.2 A importância do tempo em estado defeituoso em contextos práticos

Esse tópico ressalta a relevância de analisar e associar um custo ao tempo em estado defeituoso, baseando-se na concepção de reutilização e/ou reciclagem de itens e na redução do nível de eficiência de um sistema por conta da permanência em estado defeituoso.

4.1.2.1 Reuso e reciclagem de itens

A crescente preocupação com os aspectos ambientais trouxe uma nova perspectiva para a manutenção no segmento industrial. Nesse contexto, os produtos de segunda-mão (*second-hand products*) têm sido frequentemente usados em indústrias para diminuir custos, aumentar benefícios econômicos e contribuir para a sustentabilidade. Além disso, a reciclagem e/ou reuso de itens têm se tornado uma possibilidade para a redução do desperdício de componentes que possam ser restaurados e reintegrados à operação ou vendidos para novos mercados, como produtos de segunda-mão.

Sibidé et al (2015) enfatiza que novas legislações têm contribuído para a introdução de itens de segunda-mão no mercado, devido à combinação de iniciativas que promovem ou induzem a qualidade de sistemas ou produtos reutilizados, como por exemplo, adequação do item usado antes da revenda, garantia e redução de preços.

Essas iniciativas promovem a inserção de itens de segunda-mão em indústrias pois propiciam a comercialização de um item mais barato, com garantia e com condições de operação menor, mas similar a um novo. Como resultado, indústrias estão mais propensas a incorporarem os itens de segunda-mão em suas operações.

Um outro tipo importante de regulamentação que contribui para o uso de itens de segunda-mão é a legislação *take-back*, a qual tem extendido a responsabilidade das indústrias para recuperar e descartar com segurança seus itens (RAHIMIFARD et al, 2009).

Além do aspecto legal, estabelecido pelas legislações mencionadas acima, existem outros fatores que favorecem a utilização desse tipo de item. Yeh et al (2011) e Lo e Yu (2013), por exemplo, indicam o reuso de itens como uma das mais importantes estratégias para redução do custo de compra de materiais e para atendimento às questões de proteção ambiental. Segundo esses autores, a reutilização de um item conserva os recursos naturais, reduz custos de produção e protege o meio ambiente.

Por outro lado, a qualidade inicial do item usado é inferior ao de um item novo, de forma que duas dimensões de qualidade devem ser alcançadas: funcionalidade, que se refere às condições do item na fase inicial da segunda vida, e confiabilidade, que representa a capacidade

do item realizar sua função dentro de um período determinado durante a segunda vida (ANITYASARI et al, 2007).

Nesse sentido, as políticas de manutenção devem promover formas de atender as dimensões mencionadas. No entanto, apesar de existir um crescimento significativo em pesquisas relacionadas com a recuperação e reciclagem de produtos nas últimas décadas (ANITYASARI et al., 2007), a literatura sobre políticas de manutenção para itens de segunda mão ainda é escassa e geralmente relacionada com a perspectiva de contratos de venda ou locação (YEH et al., 2011; LO; YU, 2013).

Nesta dissertação, o modelo 3 apresentado na seção 4.2.1.5 pode contribuir para a modelagem do período ótimo de inspeção de um item que deve ser restaurado para posterior retorno ao sistema. Esse modelo leva em consideração que quanto menor o nível de degradação do componente em sua primeira vida, menor será o esforço necessário para reparar e/ou reciclar o item para futura reinserção no sistema. Desse modo, pode-se contribuir para a dimensão funcionalidade do item na segunda vida através de um período mais adequado de substituição na primeira vida.

4.1.2.2 Diminuição da eficiência do sistema

A redução da eficiência interfere negativamente em um sistema em operação, diminui a taxa de produção e aumenta a energia e esforço para atender a demanda. Além disso, em algumas situações, o tempo em estado defeituoso pode promover grandes perdas de produto, energia, capital e até mesmo causar danos ambientais e humanos.

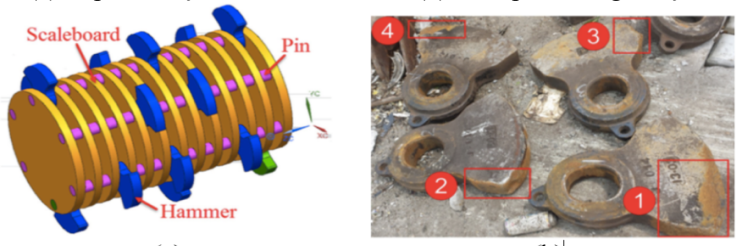
Mesmo que a funcionalidade do sistema não seja drasticamente afetada, existem situações em que um incremento no custo deve ser considerado devido ao aumento no consumo energético ou à adição desnecessária de material nos produtos resultantes do sistema, o que pode causar perdas por sobrepeso ou necessidade de retrabalho. Para esses casos, associar um custo relativo ao período em estado defeituoso é uma consideração plausível para a determinação de um modelo mais realístico.

Nesse contexto, Das e Acharya (2004) consideram a inclusão da diminuição do desempenho em modelos *delay time* adicionando uma taxa de crescimento linear ao custo durante o período em estado defeituoso. Essa possibilidade foi aplicada nesta dissertação nos modelos 1 e 2 para componente simples e 4 para sistema multicomponente.

Em termos práticos, uma possibilidade da inclusão da degradação no desempenho pode ser aplicada na modelagem do período ótimo de inspeções em uma máquina *Shredder* (Figura 18), equipamento utilizado para reduzir uma peça de material em pedaços menores. Neste tipo

de equipamento, o material introduzido é submetido a uma intensa trituração até que pedaços suficientemente pequenos sejam descartados pela máquina para serem aplicados nas etapas seguintes do processo (SANDER et al., 2004).

Figura 18 – (a) Representação de um shredder e (b) exemplo de degradação em martelos



(a) (b)

Fonte: Zhou et al. (2016, p. 446)

Durante o processamento do material colocado no *Shredder*, os martelos (*hammers*) são os componentes que estão em contato direto com o material a ser transformado, sofrendo, desta forma, um grande impacto e um significante nível de deterioração, como pode ser visualizado na Figura 18(b) (YIN et al., 2014). Nesse sentido, os martelos de uma máquina *shredder* podem ser um exemplo interessante de componente que se desgasta consideravelmente antes da falha devido às suas características estruturais e modo de operação (ZHOU et al., 2016). Esse desgaste implica na redução da eficiência da máquina e, relacionando-se também com o contexo anteriormene apresentado, quanto maior o tempo em estado defeituoso, maior a dificuldade de reparar o martelo para reinserção no sistema.

Nesta dissertação, o modelo 4, apresentado na seção 4.2.2.1, pode ser utilizado para modelar um sistema multicomponente como um *shredder* com múltiplos martelos, determinando-se o período ótimo entre inspeções e também o respectivo custo associado. De forma geral, os modelos apresentados neste capítulo possivelmente podem ser aplicados em situações nas quais o tempo em estado defeituoso implica em impactos negativo ao sistema em termos de custo, baixo desempenho, consequências ambientais e mudanças na característica de operação do equipamento.

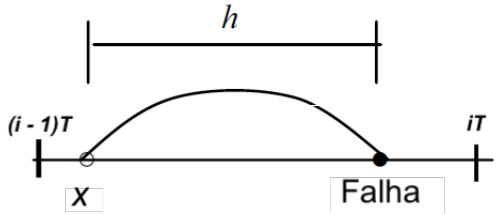
4.2 INSERÇÃO DE CUSTO ASSOCIADO AO ESTADO DEFEITUOSO EM MODELOS *DELAY TIME*

Esta seção apresenta as propostas de inserção do custo em estado defeituoso em modelos *delay time* para componentes simples e para sistemas multicomponentes.

4.2.1 Custo em estado defeituoso em modelo *delay time* para componente simples

Antes de abordar as propostas de consideração do custo em estado defeituoso, convém mostrar novamente a Figura 11 e as equações consideradas na modelagem *delay time* para componente simples, para que as modificações propostas sejam melhor visualizadas.

Figura 11 – Delay time para componente simples



Fonte: Adaptada de Wang (2008, p. 347)

$$E(T) = \frac{C(T)}{L(T)} \tag{2.8}$$

$$C(T) = \sum_{i=1}^{\infty}[iC_i + C_p] \int_{(i-1)T}^{iT} f(x)R_h(iT-x)dx + \sum_{i=1}^{\infty}[(i-1)C_i + C_f] \int_{(i-1)T}^{iT} f(x)F_h(iT-x)dx \tag{2.9}$$

$$L(T) = \sum_{i=1}^{\infty} iT \int_{(i-1)T}^{iT} f(x)R_h(iT-x)dx + \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} f(x)\left[\int_{0}^{(iT-x)} (x+h)f(h)dh\right]dx \tag{2.10}$$

As propostas apresentadas neste capítulo alteram a Equação (2.9), relacionada com o custo, para introduzir a possibilidade do custo em estado defeituoso. Além disso, assim como na modelagem tradicional, determina-se o intervalo de inspeções que minimiza o custo total esperado por unidade de tempo a longo prazo, $E(T)$ (Equação (2.8)).

Como mostrado na seção 2.2.4 e recapitulado acima, a modelagem *delay time* considera dois estágios no processo de falha, de modo que antes do componente falhar, ele necessariamente passa algum período de tempo no estágio defeituoso. Além disso, a falha pode ocorrer dentro do intervalo entre inspeções ($x + h \in [(i-1)T, iT]$) ou não ocorrer, devido à detecção e reparo do defeito na inspeção ($x \in [(i-1)T, iT]$ e $h > iT - x$).

Para ambos os casos, o custo associado com o tempo em estado defeituoso não é considerado no modelo tradicional, como pode-se observar na Equação (2.9). De acordo com esta equação, se o defeito é encontrado em uma inspeção, o custo de reparo do defeito (C_p) é o

mesmo independente do período de tempo em estado defeituoso. Do mesmo modo, se ocorre a falha, o custo de falha é o mesmo independente do período em que o componente passou no estado defeituoso.

Entretanto, existem situações em que as consequências de um período nesse estado devem ser mensuradas de forma a melhor representar a realidade. Algumas dessas situações foram descritas no tópico anterior. Para considerar a possibilidade de inclusão do custo relativo ao período em estado defeituoso na modelagem *delay time* para componente simples, são consideradas as seguintes hipóteses.

(i) O componente pode está em um dos três estados: bom, defeituoso e falho.

(ii) O sistema falha quando o componente falha.

(iii) O *delay time* h é independente do tempo de chegada do defeito x.

(iv) A inspeção acontece a cada T unidades de tempo e custa C_i unidades.

(v) Inspeções são perfeitas e qualquer defeito é identificado na inspeção subsequente.

(vi) O defeito encontrado em uma inspeção será reparado instantaneamente com custo $C_p(h)$, que pode ser alterado de forma específica em cada modelo.

(vii) A falha é reparada assim que ela acontece e tem um custo C_f ou $C_f(h)$, com $C_f \; e \; C_f(h) > C_p(h) > C_i$.

(viii) O tempo inicial de chegada do defeito, x, é distribuído de acordo com uma distribuição conhecida e é independente de h.

(ix) A função densidade de probabilidade (pdf) do *delay time* h, $f_h(h)$, também é conhecida.

Baseando-se nessas considerações, as propostas de modificação são apresentadas em seguida, por meio de três modelos distintos. O primeiro modelo insere a possibilidade do acréscimo no custo do reparo do defeito em função do tempo em estado defeituoso. O segundo altera o primeiro introduzindo a possibilidade do custo da falha também ser aumentado em função do tempo em estado defeituoso. Por fim, o terceiro permite uma redução no custo do reparo do defeito, caso o reparo seja antecipado.

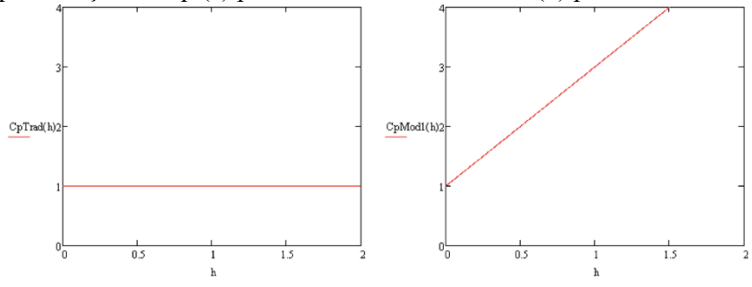
4.2.1.1 Modelo 1: Acréscimo no custo do reparo do defeito em função do tempo em estado defeituoso

Nesta proposta, o custo relacionado ao tempo em estado defeituoso é contabilizado como uma parcela do custo de reparo do defeito. Assim, se a falha ocorrer no intervalo, o custo de falha C_f será contabilizado, mas o custo relacionado ao estado defeituoso antes desta falha é considerado desprezível.

Essa consideração inicial foi feita para poder identificar, de forma comparativa com a próxima situação apresentada, como o tempo em estado defeituoso contribui tanto para este caso (interferindo apenas em C_p) quanto para o seguinte, apresentado no modelo 2 (interferindo em C_p e C_f). Desse modo, a modelagem da situação em que a falha ocorre no intervalo entre inspeções segue igual ao modelo original para este caso (modelo 1) e é alterada no seguinte (modelo 2).

O Gráfico 1 mostra a comparação do modelo 1 com o modelo tradicional, em relação à variação de C_p.

Gráfico 1 – Representação de Cp (a) para o modelo tradicional e (b) para os modelos propostos 1 e 2



Fonte: O autor (2019)

O Gráfico 1 mostra que nos modelos propostos 1 e 2 o custo do reparo do defeito varia linearmente em função do tempo de permanência neste estado. Dessa forma, se a falha não ocorrer no intervalo entre inspeções, mas um defeito for iniciado dentro deste intervalo, o custo por unidade de tempo no estado defeituoso é considerado. Assim, C_p passa a variar linearmente de acordo com o tempo de permanência em estado defeituoso, h, sendo $C_p(h) = C_p + ch$ e c representa um adicional de custo por unidade de tempo em estado defeituoso. Desse modo, a primeira parte da Equação (2.9), será modificada e representada por meio da Equação (3.1) que representa o custo $C(T)$ para esta situação.

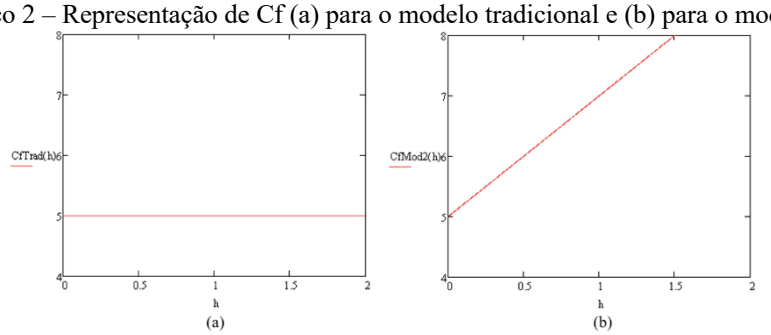
$$C(T) = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} \int_{iT-x}^{\infty} [(i)C_i + C_p + ch] f_h(h) f_x(x) dh dx + \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} [(i-1)C_i + C_f] f_x(x) F_h(iT-x) dx \quad (3.1)$$

4.2.1.2 Modelo 2: Acréscimo no custo do reparo do defeito e no custo da falha em função do tempo em estado defeituoso

Nesta proposta, o custo relacionado ao estado defeituoso influencia tanto no custo de reparo de um defeito quanto no custo de reparo de uma falha. Assim, o caso de quando a falha ocorre no intervalo deve ser remodelado para acrescentar o custo relacionado com o estado

defeituoso. O Gráfico 2 mostra a comparação do modelo 2 com o modelo tradicional, em relação à variação de C_f.

Gráfico 2 – Representação de Cf (a) para o modelo tradicional e (b) para o modelo 2



(a) (b)

Fonte: O autor (2019)

Como visto no Gráfico 2, o custo da falha passa a ser modelado de forma semelhante ao cuso do reparo do defeito, podendo ser interpretado da seguinte forma: $C_f(h)$ é a soma do custo de penalidade relativo às consequências gerais da falha, C_f, mais o custo de penalidade relativo ao período de permanência no estado defeituoso, que é considerado como uma parcela de custo de falha variável, denominada ch. Desta forma, $C_f(h) = C_f + ch$, e c representa um adicional de custo por unidade de tempo em estado defeituoso, assim como no modelo anterior. Assim, $C(T)$ com a inserção de um custo relativo ao tempo de permanência em estado defeituoso tanto para a situação de quando um defeito é identificado, quanto para a situação em que uma falha é verificada é estabelecido conforme a equação Equação (3.2).

$$C(T) = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} \int_{iT-x}^{\infty} [(i)C_i + C_p + ch] f_h(h) f_x(x) dh dx + \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} \int_{0}^{iT-x} [(i-1)C_i + C_f + ch] f_h(h) f_x(x) dh dx \tag{3.2}$$

Essas propostas, assim como as dos modelos 3 e 4 posteriormente apresentadas, apresentam duas características importantes: podem descrever situações práticas recorrentes, as quais podem ser associadas a um significativo número de casos reais e não aumentam a complexidade do modelo, podendo ser facilmente aplicadas na prática.

A próxima seção analisa os modelos 1 e 2, por meio de comparações com o modelo tradicional, com o intuito de verificar o comportamento do tempo ótimo entre inspeções e do custo total por unidade de tempo a longo prazo.

4.2.1.3 Análise dos modelos 1 e 2

Esta seção analisa, de modo comparativo, o modelo tradicional *delay time* para componente simples e os modelos acima propostos, com a consideração de um custo relativo à permanência de um componente no estado defeituoso. A avaliação consiste na análise do intervalo ótimo entre inspeções e da respectiva taxa de custo por unidade de tempo, para o modelo tradicional e para os modelos revisados.

A forma como o custo em estado defeituoso se comporta ao longo do tempo pode ser determinada de acordo com uma função que represente adequadamente a realidade prática analisada. Para as análises realizadas nesta dissertação, considera-se que o custo por unidade de tempo em estado defeituoso varia de forma linear, conforme as equações: $C_p(h) = C_p + ch$ para os modelos 1 e 2, e $C_f(h) = C_f + ch$ para o modelo 2.

Além disso, considera-se que a função de chegada do defeito, $f_x(x)$, segue uma distribuição *Weibull* com parâmetro de forma $\beta = 3$ e parâmetro de escala $\eta = 1$; a função de distribuição do *delay time* é $f_h(h) = 2e^{-2h}$; o custo de inspeção é $C_i = \$0{,}5$ por inspeção, a parcela de custo fixo para reparar um defeito é $C_p = \$1$ por reparo de defeito, a parcela de custo fixo de uma falha é $C_f = \$5$ por falha e o parâmetro c, que influencia nas funções de custo em estado defeituoso é definido na Tabela 1 e expresso em unidade monetária por unidade de tempo em estado defeituoso. A Tabela 1 mostra o período ótimo de inspeção, T, e a relação do custo pela vida, $E(T)$, para o modelo tradicional e para os modelos 1 e 2.

Tabela 1 – Impacto do efeito da inserção do custo em estado defeituoso no modelo delay time

	Tradicional	Modelo 1				Modelo 2			
c	0	1	2	3	4	1	2	3	4
T	1,191	1,233	1,304	Inf.	Inf.	1,207	1,224	1,245	1,269
E(T)	3,046	3,350	3,649	3,589	3,589	3,479	3,893	4,316	4,738

Fonte: O autor (2019)

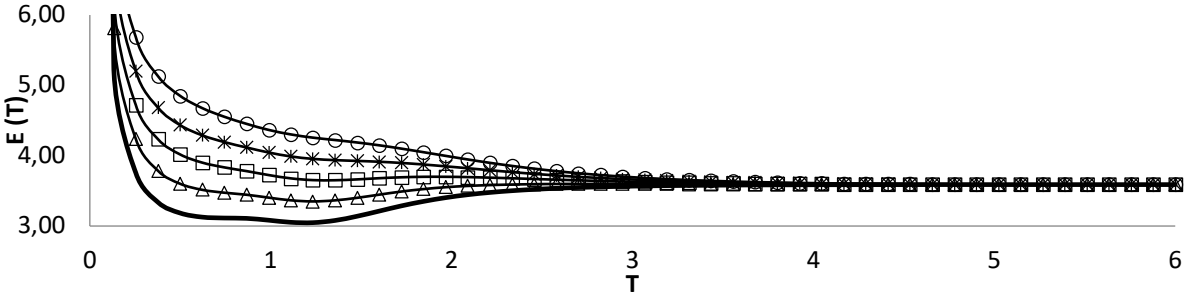
A Tabela 1 demonstra que o custo no estado defeituoso afeta diretamente o intervalo ótimo entre inspeções e a relação do custo pela vida. Considerando o modelo 1, quando o parâmetro c cresce, o intervalo entre inspeções aumenta, devido ao acréscimo no custo de reparar o defeito. Além disso, quando o valor de c cresce, existe a tendência de mudança de política, sendo sugerido para apartir de $c = 3$ a não realização de inspeção. No que se refere ao

custo, $E(T)$ cresce, como esperado, à medida em que c aumenta e pode se tornar significativamente maior, quando comparado com o modelo tradicional.

Considerando o modelo 2, quando o parâmetro c cresce, o intervalo entre inspeções aumenta, quando comparado ao modelo tradicional, mas diminui quando comparado com o modelo 1, devido à influência do tempo em estado defeituoso também no custo da falha. Como o custo de falha é aumentado neste modelo, o tempo ótimo para a realização da inspeção é menor que no modelo 1, que não contabiliza aumento devido ao tempo em estado defeituoso no custo da falha. No que concerne ao custo, à medida em que c aumenta, $E(T)$ cresce de forma mais intensa quando comparado com o modelo 1 e assim como este modelo, pode se tornar siginificativamente maior.

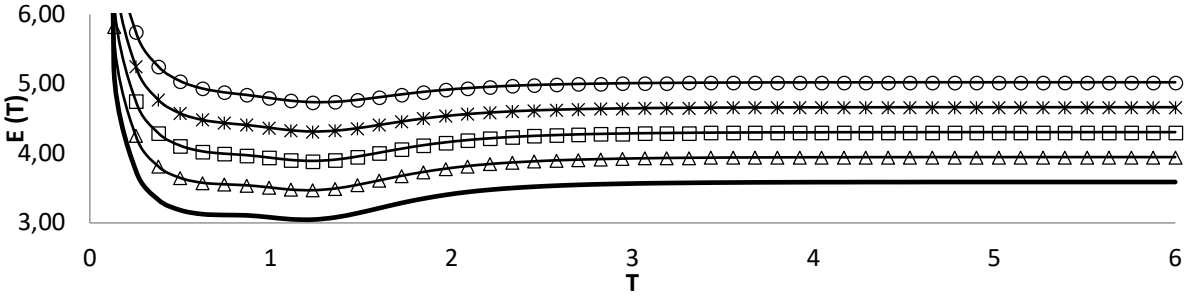
O aumento no custo esperado por unidade de tempo, $E(T)$, para os modelos 1 e 2 são mostrados nos Gráficos 3 e 4, respectivamente. Como observado nestes gráficos, quanto maior o custo em estado defeituoso, maior o aumento no custo esperado. Apesar da variação entre o intervalo das inspeções não ser tão expressivo para este exemplo em particular, a variação no custo esperado é considerável e pode afetar a forma como a manutenção é planejada.

Gráfico 3 – Custo esperado por unidade de tempo para o modelo 1 considerando diferentes valores de c
c = 0 (-); c = 1 (-Δ-); c = 2 (-□-); c = 3 (--); c = 4 (-o-)*



Fonte: O autor (2019)

Gráfico 4 – Custo esperado por unidade de tempo para o modelo 2 considerando diferentes valores de c
c = 0 (-); c = 1 (-Δ-); c = 2 (-□-); c = 3 (--); c = 4 (-o-)*



Fonte: O autor (2019)

Ambos os gráficos mostram com clareza o comportamento das curvas de custos, à medida em que c varia de zero até quatro. Como no primeiro modelo proposto, o custo da falha não é variável e portanto não aumenta, o custo da não realização da inspeção e intervenção somente na falha é constante, não importando o valor de c relacionado ao tempo em estado defeituoso. Consequentemente, quando comparado com o modelo 2, um menor valor de c já indica uma mudança de política e a não realização da inspeção.

Como no segundo modelo proposto, o custo da falha também é influenciado pelo tempo de permanência no estado defeituoso, não se tem um custo de falha constante, como pode-se observar no Gráfico 4. Assim, para este caso, a mudança de uma política de realização de inspeção para uma política de reparo na falha é menos indicada e geralmente sugerida para valores mais elevados de c, quando comparado com o modelo anterior. Como observado na Tabela 1 e nos Gráficos 3 e 4, quando o valor do parâmetro $c = 3$, já é indicada uma mudança de política no modelo 1 e no caso do modelo 2, mesmo quando $c = 4$, ainda não se tem esse indicativo.

De forma geral, quando o valor do parâmetro c se eleva consideravelmente, a realização de inspeções não necessariamente possibilita a minimização do custo, dado que o valor mínimo esperado do custo pode ultrapassar o caso de quando a inspeção é postergada para o infinito, caracterizando só intervir na falha. Entretanto, à medida em que o custo de falha aumenta, devido à influência da consideração do período em estado defeituoso anterior a sua ocorrência, esta situação se torna mais difícil de acontecer, viabilizando a determinação de um período ótimo entre inspeções.

Este comparativo, entre os modelos é interessante pois mostra claramente como o custo do reparo do defeito e o custo do reparo da falha podem ser influenciados pelo período de permanência no estado defeituoso. Entretanto, deve-se esclarecer que a aplicação prática dessas propostas a uma situação real específica deve avaliar uma série de fatores como os descritos no passo a passo da metodologia anteriormente apresentada.

4.2.1.4 Sensibilidade dos modelos 1 e 2 em relação à variação em C_f e C_i

Esta seção trata da sensibilidade dos modelos 1 e 2 diante de uma variação nos custos de falha ou de inspeção. O intuito dessa análise é verificar a consistência das soluções ótimas obtidas frente a possíveis variações nesses custos.

Para análise, o caso base apresentado no tópico anterior é comparado com casos em que os custos de falha ou de inspeção são aumentados ou diminuidos em 20%. Quando os custos de inspeção ou de falha aumentarem, $E(T)$ também deve aumentar, quando comparado à mesma

situação no caso base. Além disso, quando o custo da falha aumentar, o intervalo ótimo entre inspeções, T, deve diminuir pois a penalidade associada ao evento de falha se eleva. Quando o custo de inspeção aumentar, T deve aumentar pois o acréscimo no custo da inspeção tende a retardar a realização deste evento.

A Tabela 2 exibe a análise de sensibilidade e retrata o comportamento do modelo de acordo com situações de variação em C_f ou C_i.

Tabela 2 – Sensibilidade dos modelos 1 e 2 em relação à variação de Cf e Ci

				Modelo 1		Modelo 2	
	C_i	C_f	c	T	$E(T)$	T	$E(T)$
Caso base	0,5	5	0	1,191	3,046	1,191	3,046
			1	1,233	3,350	1,207	3,479
			2	1,304	3,649	1,224	3,893
			3	Infinito	3,589	1,245	4,136
			4	Infinito	3,589	1,269	4,738
Diminuindo C_f	0,5	4	0	1,258	2,557	1,258	2,557
			1	1,351	2,852	1,286	2,978
			2	Infinito	2,871	1,321	3,398
			3	Infinito	2,871	1,368	3,815
			4	Infinito	2,871	1,437	4,228
Aumentando C_f	0,5	6	0	0,593	3,511	0,593	3,511
			1	1,176	3,836	0,628	3,965
			2	1,211	4,149	1,170	4,378
			3	Infinito	4,307	1,183	4,803
			4	Infinito	4,307	1,198	5,227
Diminuindo C_i	0,4	5	0	0,610	2,991	0,610	2,991
			1	1,191	3,230	1,167	3,417
			2	1,246	3,604	1,183	3,842
			3	Infinito	3,589	1,202	4,267
			4	Infinito	3,589	1,223	4,690
Aumentando C_i	0,6	5	0	1,225	3,096	1,225	3,096
			1	1,273	3,397	1,242	3,519
			2	Infinito	3,589	1,262	3,941
			3	Infinito	3,589	1,285	4,362
			4	Infinito	3,589	1,313	4,781

Fonte: O autor (2019)

Antes de abordar a sensibilidade do modelo às variações dos valores de C_f ou C_i, é importante mencionar que para todos os casos específicos analisados, o efeito da variação de c

dentro de cada caso se manteve com a mesma característica do caso base. Assim, em todos os casos, dados os valores de $E(T)$ e T relacionados ao modelo tradicional, quando c não é contabilizado, ocorre o aumento de T e o aumento de $E(T)$ à medida que c cresce.

Além disso, a mudança de política anteriormente observada, quando c aumenta no modelo 1, manteve-se em todos os casos analisados e o fato previamente verificado de o modelo 2 indicar um período ótimo T mais curto para realização de inspeção, devido ao aumento no custo da falha, também foi observado em todos os casos analisados. No que se refere ao custo $E(T)$, para todos os casos analisados, o modelo 2 estabelece um valor mais elevado quando comparado com o modelo 1, como esperado, devido ao incremento no custo da falha propocional ao tempo em estado defeituoso.

De fato, comparando-se os modelos 1 e 2, em todas as situações, ocorrem no segundo modelo um pequeno aumento no custo e uma pequena redução no período ótimo entre inspeções. Como já mencionado, tanto o aumento no custo como a redução no período ótimo de inspeção no modelo 2 quando comparado com o modelo 1 são devidos ao incremento no custo da falha.

No que se refere à sensibilidade de T à variação no valor de C_f, observa-se em ambos os modelos que quando C_f aumenta, T diminui. De forma contrária, a diminuição em C_f, provoca um aumento em T, como esperado. Em se tratando da sensibilidade de $E(T)$ à variação no valor de C_f, observa-se que quando C_f aumenta, $E(T)$ aumenta e quando C_f diminui, $E(T)$ diminui.

No que se refere à sensibilidade de T e $E(T)$ à variação no valor de C_i, observa-se nos dois modelos que quando C_i aumenta, T aumenta e quando C_i diminui, T diminui. Além disso, nota-se que quando C_i aumenta, $E(T)$ aumenta e quando C_i diminui, $E(T)$ diminui, como esperado.

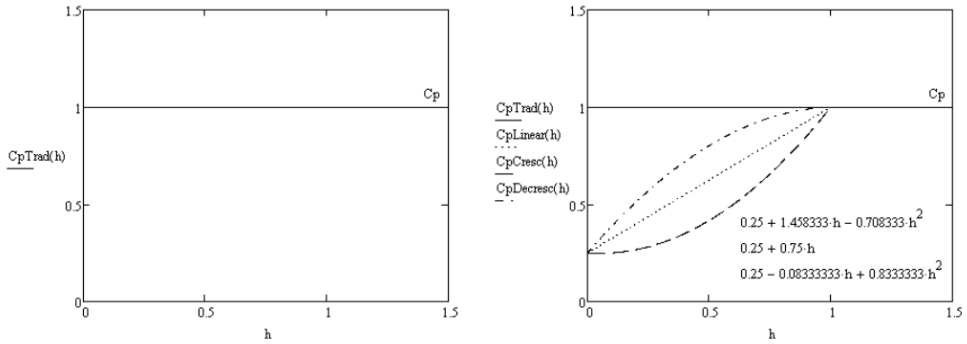
Os comportamentos dos modelos mostram-se oportunos diante das variações nas mudanças dos parâmetros C_f e C_i. As variações T e $E(T)$ mostram-se logicamente aceitáveis, de forma que os modelos conseguem inserir o custo relativo ao tempo em estado defeituoso na modelagem delay time sem inserir perturbações inadequadas na modelagem.

4.2.1.5 Modelo 3: Decréscimo no custo do reparo do defeito em função do tempo em estado defeituoso

Nesta proposta, insere-se a possibilidade do custo do reparo do defeito ser reduzido. Nesse sentido, propõe-se que o custo de reparo do defeito cresça de um determinado percentual de C_p até C_p, no qual se estabelece a partir de uma determinada duração de *delay time*. Essa

possibilidade de redução no custo do reparo do defeito está em consonância com a situação anteriormente apresentada que trata do reuso/reciclagem de um item ou componente. Como visto no tópico 4.1.2.1, quanto antes o componente for reparado, menor será o custo associado ao reparo. O Gráfico 5 mostra a comparação do modelo tradicional com o modelo 3, o qual permite uma variação no valor de C_p, até um determinado tamanho de *delay time*.

Gráfico 5 – (a) Modelo delay time tradicional e (b) Modelo 3 com curvas de variação para o valor de Cp



(a) (b)

Fonte: O autor (2019)

Como visto no Gráfico 5, o custo do reparo do defeito passa a ser definido de duas formas distintas: em função de *h* até um determinado valor de *delay time* $\frac{1}{\lambda}$, previamente definido, conforme estabelecido na Equação (3.4) abaixo, e C_p a partir desta duração. Visto essa consideração, a Equação (2.9) que representa o custo $C(T)$ para o modelo tradicional pode ser representada conforme a Equação (3.3) e $C_p(h)$ é definida por partes conforme a Equação (3.4).

$$C(T) = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} \int_{iT-x}^{\infty} [(i)C_i + C_p(h)] f_h(h) f_x(x) dh dx + \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} [(i-1)C_i + C_f] f_x(x) F_h(iT-x) dx \quad (3.3)$$

$$C_p(h) = \begin{cases} função\ de\ h, & se\ h \leq \frac{1}{\lambda} \\ C_p, & se\ h > \frac{1}{\lambda} \end{cases} \quad (3.4)$$

4.2.1.6 Análise do modelo 3

Esta seção analisa, de modo comparativo, o modelo tradicional *delay time* para componente simples e o modelo 3, que considera a possibilidade de redução no custo do reparo do defeito para uma determinada faixa de tamanho de *delay time*. Assim como na análise realizada nos modelos anteriormente apresentados, a avaliação consiste na análise do intervalo

ótimo entre inspeções e da respectiva taxa de custo por unidade de tempo, para o modelo tradicional e para o modelo proposto.

Como visto no tópico anterior, o modelo 3 apresenta a possibilidade de redução do custo do reparo do defeito, que passa a variar de acordo com a Equação (3.4). Para as análises realizadas nesta seção, considera-se que a função de chegada do defeito, $f_x(x)$, segue uma distribuição Weibull com parâmetro de forma $\beta = 3$ e parâmetro de escala $\eta = 5$; a função de distribuição do *delay time* é $f_h(h) = \lambda e^{-\lambda h}$; o custo de inspeção é $C_i = \$0{,}05$ por inspeção, o custo de falha é $C_f = \$30$ por falha. A parcela de custo fixo para reparar um defeito, C_p, e o parâmetro λ são definidos na Tabela 3. Além disso, a "*função de h*" mencionada na Equação (3.4) pode ser linear, quadrática crescente ou quadrática decrescente, conforme estabelecido na Tabela 3. Por fim, quando $h \leq \frac{1}{\lambda}$, $C_p(h)$ varia de $\frac{C_p}{4}$ quando $h = 0$ a C_p quando $h = \frac{1}{\lambda}$.

Tabela 3 – Funções de h aplicadas na Equação 3.4

Parâmetros	Funções de h aplicadas na Equação (3.4)	
C_p = 1	Linear	$0{,}25 + 0{,}75h$
e	Quadrática crescente	$0{,}25 - 0{,}08333333h + 0{,}8333333h^2$
λ = 1	Quadrática decrescente	$0{,}25 + 1{,}458333h - 0{,}708333h^2$
C_p = 2	Linear	$0{,}5 + 0{,}75h$
e	Quadrática crescente	$0{,}5 - 0{,}15h + 0{,}45h^2$
λ = 0,5	Quadrática decrescente	$0{,}5 + 1{,}45h - 0{,}35h^2$
C_p = 3	Linear	$0{,}75 + 0{,}75h$
e	Quadrática crescente	$0{,}75 - 0{,}075h + 0{,}275h^2$
λ = 0,333	Quadrática decrescente	$0{,}75 + 1{,}583333h - 0{,}2777778h^2$
C_p = 4	Linear	$1 + 0{,}75h$
e	Quadrática crescente	$1 + 0{,}07h + 0{,}17h^2$
λ = 0,25	Quadrática decrescente	$1 + 1{,}28h - 0{,}1333333h^2$

Fonte: O autor (2019)

A Tabela 3 mostra todas as funções utilizadas para a análise do modelo 3. Todas elas foram estabelecidas de forma a atender a condição em que $C_p(h)$ deve variar de $\frac{C_p}{4}$ quando $h = 0$ a C_p quando $h = \frac{1}{\lambda}$. Considera-se também que à medida em que a faixa de tamanho de *delay*

time na qual ocorre a redução no custo do reparo de defeito aumenta, o valor base definido para C_p aumenta proporcionalmente.

A Tabela 4 mostra o período ótimo de inspeção, T, e a relação do custo pela vida, $E(T)$, para o modelo tradicional e para quatro situações distintas do modelo 3, sendo 3 possibilidades de formato de curva $C_p(h)$ apresentados para cada situação, conforme as equações apresentadas na Tabela 3.

Tabela 4 – Comparação entre modelo tradional e modelo 3

	Tradicional	Modelo 3		
		Formatos de curva		
		Linear	Quad Cresc	Quad Decresc
	$C_p = 1$	$C_p = 1$ e $\lambda = 1$		
T	0,13206	0,13027	0,13008	0,13044
$E(T)$	1,00386	0,95288	0,93426	0.96871
	$C_p = 2$	$C_p = 2$ e $\lambda = 0,5$		
T	0,19138	0,18539	0,18487	0,18599
$E(T)$	0,98453	0,87797	0,83752	0.90944
	$C_p = 3$	$C_p = 3$ e $\lambda = 0,333$		
T	0,24440	0,23162	0,23017	0,23289
$E(T)$	1,09231	0,93008	0,87454	0,98617
	$C_p = 4$	$C_p = 4$ e $\lambda = 0,25$		
T	0,29908	0,27274	0,27380	0,27669
$E(T)$	1,24011	1,02268	0,96178	1,06963

Fonte: O autor (2019)

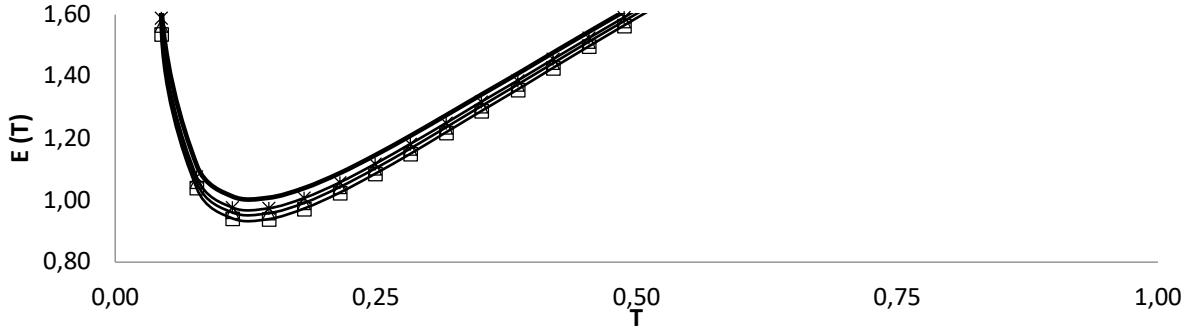
Assim como constatado na análise dos modelos 1 e 2, percebe-se na Tabela 4 que quando C_p aumenta, tanto no modelo tradicional quanto no modelo 3, o período ótimo entre inspeções aumenta e a taxa de custo por unidade de tempo também aumenta, como esperado. Quando o modelo tradicional e o modelo 3 são analisados de forma comparativa, percebe-se, em todas as situações de custo e tamanho de *delay time* analisados, que há uma redução no período ótimo entre inspeções e uma redução na taxa de custo.

Como já esperado pelo comportamento das funções $C_p(h)$ definidas na Tabela 3, essas reduções são maiores quando se utiliza uma função quadrática crescente, um pouco menor quando se utiliza uma função linear e menor quando se utiliza uma função quadrática decrescente. Além disso, verifica-se, ainda, que quanto maior o tamanho do *delay time* definido

para estabelecer a possibilidade de variação no valor de C_p e, consequentemente, quanto maior o valor base de C_p, maior é o impacto das reduções no tempo e no custo.

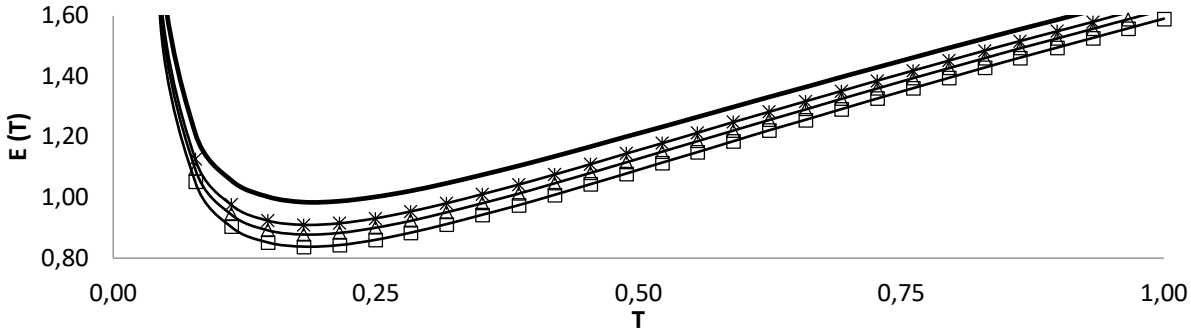
A diminuição no custo esperado por unidade de tempo, $E(T)$, para todas as situações apresentadas na análise do modelo 3, é mostrada nos Gráficos 6, 7, 8 e 9.

Gráfico 6 – Comparação do modelo 3 com o modelo tradicional quando $C_p = 1$ e $\lambda = 1$
Tradicional (-); Linear (-Δ-); Quadrático crescente (-□-); Quadrático decrescente (-*-)



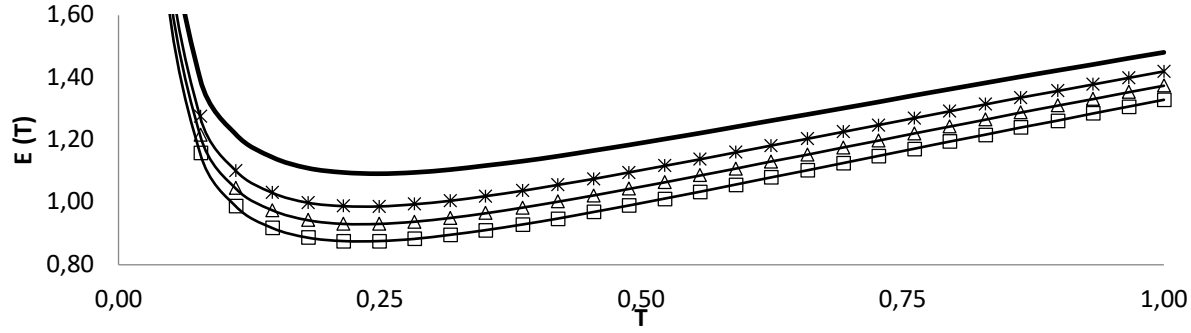
Fonte: O autor (2019)

Gráfico 7 – Comparação do modelo 3 com o modelo tradicional quando $C_p = 2$ e $\lambda = 0{,}5$
Tradicional (-); Linear (-Δ-); Quadrático crescente (-□-); Quadrático decrescente (-*-)



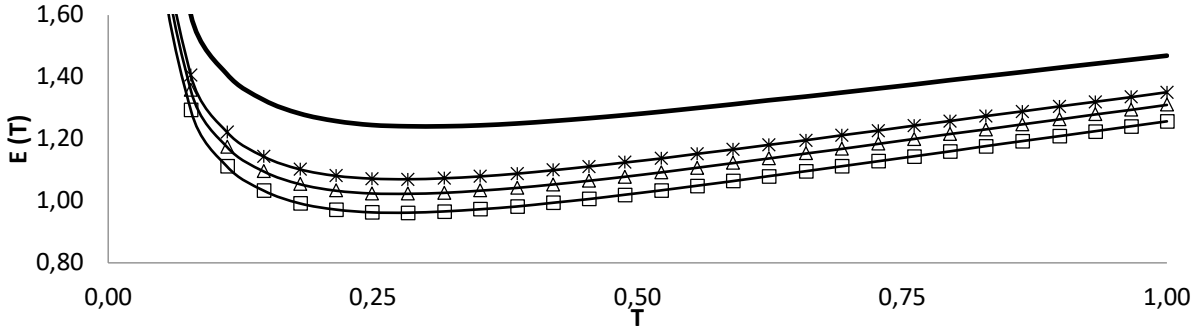
Fonte: O autor (2019)

Gráfico 8 – Comparação do modelo 3 com o modelo tradicional quando $C_p = 3$ e $\lambda = 0{,}333$
Tradicional (-); Linear (-Δ-); Quadrático crescente (-□-); Quadrático decrescente (-*-)



Fonte: O autor (2019)

Gráfico 9 – Comparação do modelo 3 com o modelo tradicional quando $C_p = 4$ e $\lambda = 0{,}25$
Tradicional (-); Linear (-Δ-); Quadrático crescente (-□-); Quadrático decrescente (-*-)



Fonte: O autor (2019)

Os Gráficos 6, 7, 8 e 9 mostram de forma clara o comportamento do modelo 3 em comparação com o modelo tradicional. Apesar da redução no período ótimo entre inspeções não ser facilmente detectada, evidencia-se a redução do custo anteriormente comentada: maior para a função quadrática crescente, menos intensa para a função linear e menor para a função quadrática decrescente. Além disso, percebe-se, por meio da comparação entre os gráficos, o comportamento de maior impacto nas reduções no tempo e no custo quando o tamanho do *delay time* definido para estabelecer a possibilidade de variração no valor de C_p e o valor base de C_p são maiores.

Esse comportamento de redução tanto em T quanto em $E(T)$ indica que esse modelo pode ser usado no contexto de reuso de itens, comentado na seção 4.1.2.1. No entanto, para a aplicação do modelo em um contexto real, necessita-se de uma série de informações para a confirmação que o modelo de fato pode ser uma boa representação da realidade específica a ser modelada e também para que a definição dos parâmetros seja adequada. Essas informações podem ser levantadas a partir da aplicação da metodologia para modelagem em manutenção proposta por esta dissertação.

A próxima seção analisa como o modelo 3 se comporta diante de uma variação no custo de falha C_f ou no custo de inspeção, C_i.

4.2.1.7 Sensibilidade do modelo 3 em relação à variação de C_i e C_f

Esta seção trata da sensibilidade do modelo 3 diante de uma variação nos custos de falha ou de inspeção. Assim como na análise de sensibilidade anteriormente realizada para os modelos 1 e 2, o intuito dessa análise é verificar a consistência das soluções ótimas obtidas frente a possíveis variações nesses custos.

Para análise, o caso base apresentado no tópico anterior é comparado com casos em que os custos de falha ou de inspeção são aumentados ou diminuidos em 20%. Quando os custos de inspeção ou de falha aumentarem, $E(T)$ também deve aumentar, quando comparado à mesma situação no caso base. Além disso, quando o custo de falha aumentar, o intervalo ótimo entre inspeções, T, deve diminuir pois a penalidade associada ao evento de falha se eleva. Quando o custo de inspeção aumentar, T deve aumentar pois o acréscimo no custo da inspeção tende a retardar a realização deste evento.

A Tabela 5 exibe a análise de sensibilidade e retrata o comportamento do modelo 3 de acordo com situações de variação em C_f ou C_i.

Tabela 5 – Sensibilidade do modelo 3 em relação à variação de C_i e C_f

				$C_p = 1$ e $\lambda = 1$		$C_p = 4$ e $\lambda = 0.25$	
	C_i	C_f	c	T	$E(T)$	T	$E(T)$
Caso base	0,05	30	Tradicional	0,13206	1,00386	0,29908	1,24011
			Linear	0,13027	0,95288	0,27274	1,02268
			Quad cresc	0,13008	0,93426	0,27380	0,96178
			Quad decres	0,13044	0,96871	0,27669	1,06963
Diminuindo C_f	0,05	24	Tradicional	0,14958	0,91520	0,35310	1,18896
			Linear	0,14705	0,86548	0,31570	0,97599
			Quad cresc	0,14675	0,84700	0,31280	0,91549
			Quad decres	0,14731	0,88118	0,31822	1,02265
Aumentando C_f	0,05	36	Tradicional	0,11947	1,08366	0,26385	1,28474
			Linear	0,11813	1,03175	0,24743	1,06425
			Quad cresc	0,11799	1,01302	0,24525	1,00312
			Quad decres	0,11825	1,04766	0,24786	1,11141
Diminuindo C_i	0,04	30	Tradicional	0,11737	0,92375	0,26581	1,20474
			Linear	0,11579	0,87167	0,24451	0,98421
			Quad cresc	0,11563	0,85293	0,24249	0,92306
			Quad decres	0,11592	0,88760	0,24584	1,03139
Aumentando C_i	0,06	30	Tradicional	0,14552	1,07583	0,32953	1,27188
			Linear	0,14356	1,02583	0,30296	1,05724
			Quad cresc	0,14332	1,00733	0,30054	0,99663
			Quad decres	0,14376	1,04157	0,30478	1,10399

Fonte: O autor (2019)

A Tabela 5 retrata o comportamento do modelo 3 diante de variações nos custos de falha ou inspeção para as situações em que $C_p = 1$ e $\lambda = 1$, e $C_p = 4$ e $\lambda = 0{,}25$. As demais situações

foram omitidas por apresentarem o mesmo comportamento das apresentadas. Dessa forma, os comentários abaixo descritos servem para todas as situações analisadas no modelo 3.

No que se refere à sensibilidade de T e $E(T)$ à variação de C_f, analisando-se a Tabela 5, percebe-se que independentemente do comportamento da função analisada ou dos valores de C_p e λ, quando C_f aumenta, T diminui e $E(T)$ aumenta, devido a maior penalidade associada com o evento de uma falha. De forma semelhante, quando C_f diminui, T aumenta e $E(T)$ diminui, como esperado.

Em se tratando da sensibilidade de T e $E(T)$ à variação de C_i, verifica-se que independentemente do comportamento da função analisada ou dos valores de C_p e λ, quando C_i aumenta, T aumenta e $E(T)$ aumenta, devido ao maior custo referente à realização de uma inspeção. De fato, quando um custo associado a um evento aumenta, a tendência esperada é a postergação deste evento e a elevação do custo. De forma semelhante, quando C_i diminui, T diminui e $E(T)$ diminui, como esperado.

Assim, o comportamento do modelo 3 mostra-se oportuno diante das variações nas mudanças dos parâmetros C_f e C_i. Assim como nos modelos anteriormente analisados, as variações T e $E(T)$ mostram-se logicamente aceitáveis, de forma que o modelo consegue redefinir o modelo tradicional, inserindo a possibilidade da redução do custo do reparo do defeito, sem inserir perturbações inadequadas na modelagem.

O tópico seguinte aborda como o custo relativo ao tempo em estado defeituoso pode ser modelado para o contexto de sistemas multicomponentes.

4.2.2 Custo em estado defeituoso em modelo *delay time* para sistemas complexos

A inserção do custo em estado defeituoso para o caso de um sistema multicomponente tem como base o modelo *delay time* para sistemas complexos desenvolvido por Christer e Waller (1984) e apresentado na seção 2.2.4.1 desta dissetação. As hipóteses levantadas por esses autores são novamente consideradas e a hipótese que o tempo em estado defeituoso interfere no custo esperado para manter o sistema em um regime de inspeções a cada T unidades de tempo é introduzida. Assim, a proposta de inclusão do custo em estado defeituoso é baseada nas seguintes hipóteses:

(i) Uma inspeção ocorre a cada T unidades de tempo, custa C_i unidades monetárias e requer d unidades de tempo, sendo $d \ll T$.

(ii) As inspeções são perfeitas, de modo que qualquer defeito presente será identificado.

(iii) Os defeitos identificados em uma inspeção são reparados no próprio período de inspeção.

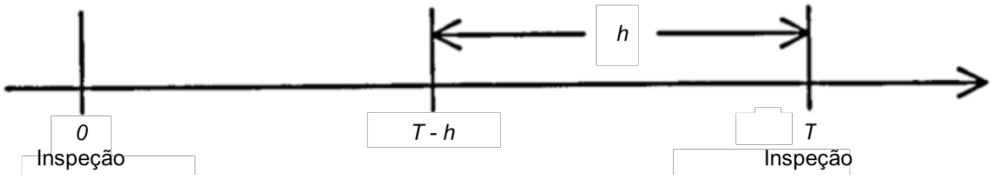
(iv) O instante inicial da chegada do defeito (também conhecido como a origem do defeito) é uniformemente distribuído ao longo do tempo, desde a última inspeção, e independente do período em estado defeituoso. Além disso, os defeitos surgem a uma taxa k por unidade de tempo.

(v) A função densidade de probabilidade, pdf, do delay time é conhecida $f_h(h)$.

(vi) O tempo em estado defeituoso interfere no custo esperado para manter o sistema em um regime de inspeções a cada T unidades de tempo.

Estabelecidas as hipóteses norteadores do modelo, antes de abordar a proposta de modificação, convém mostrar novamente a Figura 9 e as equações consideradas na modelagem *delay time* para planta complexa, para que a modificação proposta seja melhor visualizada e seu efeito melhor entendido.

Figura 9 – Tempo em estado defeituoso para falha e para identificação do defeito na inspeção



Fonte: Adaptada de Lee (1999, p. 40)

$$b(T) = \int_{h=0}^{T} \left(\frac{T-h}{T} \right) f(h) dh \tag{2.4}$$

$$C(T) = \frac{1}{(T+d)} \left[\!\!\left[kT \left\{ C_f b(T) + C_r \left[1 - b(T) \right] \right\} + C_i \right]\!\!\right] \tag{2.6}$$

Como já mencionado, dado o intervalo $[0, T]$ da Figura 9, a probabilidade de um defeito se transformar em falha dentro deste intervalo é dada pela Equação (2.4) e o custo esperado para manter o sistema em um regime de inspeções a cada T unidades de tempo é obtido por meio da Equação (2.6). Analisando-se essas equações, percebe-se que não se contabiliza um custo associado ao tempo em que o sistema passa em estado defeituoso.

Assim sendo, a proposta a seguir trata de uma forma de inserir um custo associado ao tempo de permanência neste estado. A inclusão desse custo tem o objetivo de modelar mais adequadamente situações em que o tempo em estado defeituoso afeta negativamente o sistema, por exemplo, contribuindo para a redução do desempenho, por meio da diminuição da

eficiência, ou interferindo no custo de reparo e/ou reciclagem de itens, que se eleva à medida em que o item passou mais tempo se degradando.

4.2.2.1 Modelo 4: Inserção do custo relacionado ao período em estado defeituoso para sistema multicomponente

Nesta proposta, o custo relacionado ao tempo em estado defeituoso é inserido tomando-se o tempo em que o sistema passa nesse estado e multiplicando-se por um parâmetro de custo, denominado *c*, o qual estabelece como este tempo influencia na determinação do custo esperado $C(T)$ para manter o sistema em um regime de inspeções a cada T unidades de tempo. A Equação (3.4) insere o custo relacionado ao tempo em estado defeituoso para a modelagem *delay time* voltada para sistema multicomponente.

$$C(T) = \frac{1}{(T+d)}\left[kT\left\{ C_f b(T) + C_r\left[1 - b(T)\right] + c\int_0^T h f_h(h)dh \right\} + C_i \right] \tag{3.4}$$

Diferentemente das modificações propostas para o caso de componente simples, o custo relativo ao estado defeituoso não necessariamente interfere no custo da falha ou no custo de reparo do defeito, sendo apenas somado à modelagem previamente existente, que não o considera. Esta é uma simplificação realizada de forma a obter uma modelagem que mesmo simples pudesse retratar a realidade de forma mais condizente. Assim, o valor esperado do *delay time* é multiplicado por um custo associado e depois multiplicado pela quantidade de defeitos que chega no período.

Além disso, como pode-se observar na Equação (3.4), a modificação apresentada consegue inserir na modelagem a capacidade de considerar uma característica importante de ser modelada em alguns casos específicos em que o tempo em estado defeituoso, de fato, interfere negativamente na performance do equipamento e no custo da manutenção.

Visto isso, a próxima seção analisa a modelagem proposta, por meio da apresentação de um exemplo hipotético, trazendo uma comparação entre o modelo tradicional e o modelo com a modificação proposta.

4.2.2.2 Análise do modelo 4

Esta seção avalia, de modo comparativo, como a inserção do custo associado ao tempo em estado defeituoso interfere no modelo *delay time* para sistema multicomponente. A avaliação pauta-se na análise do intervalo ótimo para realização de inspeção, T, e também no

custo esperado $C(T)$ para manter o sistema em um regime de inspeções a cada T unidades de tempo.

Para tanto, um exemplo hipotético foi elaborado para o estabelecimento de valores numéricos para a taxa k de chegada de defeitos por unidade de tempo, para os parâmetros de custo e também para a definição da função densidade do *delay time.* Entretanto, antes de definir os parâmetros e a função utilizados na análise, faz-se necessário esclarecer que, na modelagem proposta, a forma como o tempo em estado defeituoso interfere no custo relativo à permanência neste estado é linear, mas pode-se e deve-se ajustar a influência do tempo neste estado conforme a realidade prática analisada.

Posto isso, considera-se que os defeitos surgem a uma taxa $k = 15$ defeitos por unidade de tempo (ano) e a função de distribuição do *delay time* $f_h(h)$ segue uma distribuição exponencial: $f_h(h) = 4e^{-4h}$. A inspeção requer $d = 0$ unidade de tempo para ser realizada, e custa $C_i = \$75$ por inspeção. O custo de reparar um defeito é $C_r = \$8$ por reparo de defeito e o custo do sistema falhar é $C_f = \$100$. Por fim, o parâmetro c, que influencia no valor do custo de permanência no estado defeituoso é definido na Tabela 6 e expresso em unidade monetária por unidade de tempo em estado defeituoso (ano).

A Tabela 6 mostra o efeito do acréscimo do custo relativo ao estado defeituoso no modelo *delay time* para um sistema multicomponente, para o exemplo hipotético apresentado. Quando $c = 0$, representa-se o modelo tradicional e, quando c varia para os outros valores, verifica-se a influência da modificação proposta no modelo, em termos do intervalo ótimo para realização de inspeção, T, e também do custo esperado $C(T)$ para manter o sistema em um regime de inspeções a cada T unidades de tempo (ano).

Tabela 6 – Impacto do efeito da inserção do custo em estado defeituoso no modelo delay time

	Tradicional	**Proposto** (com possibilidade de variação em *c*)				
c	0	20	40	60	80	100
T	0,218	0,209	0,201	0,194	0,188	0,183
$C(T)$	923,163	938,937	953,77	967,908	981,161	993,916

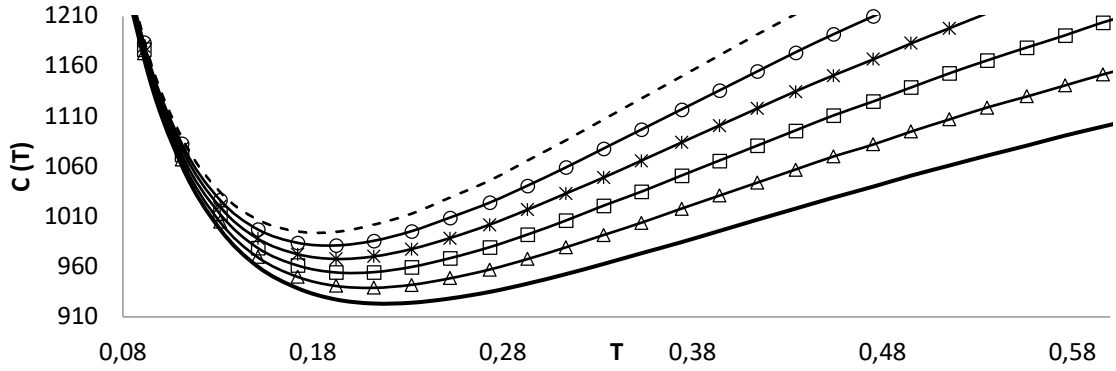
Fonte: O autor (2019)

Assim como no caso de componente simples analisado anteriormente, a Tabela 6 demonstra que o custo no estado defeituoso afeta diretamente o intervalo ótimo para realização da inspeção e o custo esperado $C(T)$. De fato, quando o parâmetro c cresce, T diminui e $C(T)$ torna-se maior, como esperado. É importante ressaltar que essa diminuição em T e aumento em

$C(T)$ pode ser mais ou menos influenciados de acordo com a forma à qual o tempo em estado defeituoso interfere em termos de custo para o sistema. Em uma situação prática, por exemplo, se for detectado que o tempo nesse estado exerce um impacto mais intenso em termos de custos para o sistema, pode-se associar uma função que melhor caracterize essa particularidade.

No que se refere a uma análise gráfica e comparativa entre o modelo tradicional e a modificação apresentada, apresenta-se no Gráfico 10 a redução no período ótimo para inspeção, T, e o aumento no custo esperado $C(T)$, à medida em que c aumenta.

Gráfico 10 – Custo esperado para manter o sistema em um regime de inspeções a cada T unidades de tempo
c = 0 (-); c = 20 (-Δ-); c = 40 (-□-); c = 60 (-*-); c = 80 (-o-) e c = 100 (- - -)



Fonte: O autor (2019)

O Gráfico 10 representa o comportamento de $C(T)$ ao longo do tempo para os diferentes valores de c. Como observado, quanto maior o custo em estado defeituoso, menor o intervalo ótimo para inspeção e maior o aumento no custo esperado. Além disso, verifica-se que, assim como nos modelos anteriormente propostos por esta dissertação, o impacto da inspeção não ser realizada no período ótimo é superior em termos de custo quando comparado ao modelo tradicional. Como já explicado anteriormente, isso se mostra importante para evidenciar o benefício da não postergação da ação de manutenção, visto que o impacto negativo no custo pode ser facilmente percebido.

Por fim, cabe ressaltar que esta proposta de modelagem mostra-se como uma possível alternativa ao modelo *delay time* para sistema multicomponente, podendo-se ser melhor aplicada para um tipo de situação prática em que o tempo em estado defeituoso interfere tanto na periodicidade como nos custos envolvidos na atividade de manutenção. Assim como nas modificações anteriormente propostas para o caso de componente simples, a modificação apresentada para sistema multicomponente permite uma inclusão coerente de uma parcela de custo relativa ao tempo em estado defeituoso, anteriormente não considerada no modelo.

A possibilidade de melhor adequação do modelo a alguns tipos de situações reais, por meio da consideração de uma característica fundamental para alguns casos práticos, permite estabelecer uma política de inspeção mais condizente com a realidade, além de ampliar ou facilitar a possibilidade de reciclagem de itens que se deterioram menos em função da redução do tempo de permanência no estado defeituoso, necessitando, desta forma, de menor esforço de recuperação para voltarem a ser utilizados no processo produtivo.

A análise de como o modelo se comporta diante de variações em C_i, C_r, C_f e k é estabelecida na seção a seguir.

4.2.2.3 Sensibilidade do modelo 4 em relação à variação em C_i, C_r, C_f e k

Esta seção analisa a sensibilidade do modelo proposto quando o custo de inspeção C_i, o custo de reparo de um defeito C_r, o custo de falha C_f e a taxa de chegada de defeitos por unidade de tempo k variam. Objetiva-se verificar se o comportamento do período ótimo para realização de inspeção T e o custo esperado $C(T)$ alteram-se de forma coerente com a diminuição ou aumento nos valores dos parâmetros citados.

Assim como nas análises de sensibilidade anteriormente realizadas, o caso base é comparado com casos em que os parâmetros acima descritos são aumentados ou diminuídos em 20%. Quando C_i, C_r, C_f ou k são aumentados, espera-se que o valor de $C(T)$ aumente devido à elevação da influência de um desses parâmetros no custo esperado e quando C_i, C_r, C_f ou k são diminuidos, espera-se que o valor de $C(T)$ diminua pela redução da influência de um desses parâmetros no custo esperado. Quando C_i ou C_r são aumentados, espera-se que T aumente e quando C_i ou C_r, são diminuidos, espera-se que T diminua. Isso porque quando o efeito de um custo de inspeção ou de reparo de defeito é mais reduzido ou mais elevado, propicia-se que a inspeção seja, respectivamente, adiantada ou retardada. Quando C_f ou k são aumentados, espera-se que T diminua e quando C_f ou k são diminuídos espera-se que T aumente. Isso ocorre pois à medida que a penalidade relacionada com a falha ou o número de componentes em estado defeituoso aumentam, a tendência é antecipar o período de inspeção para evitar a ocorrência da falha.

Posto isso, antes de abordar a sensibilidade do modelo às variações dos valores de C_i, C_r, C_f ou k, é relevante mencionar que para todos os casos específicos analisados, o efeito da variação de *c* dentro de cada caso se manteve com a mesma característica do caso base. Assim, em todos os casos, à medida em que c cresce, os valores de T diminuem e os valores de $C(T)$ aumentam, como esperado.

A Tabela 7 exibe a análise de sensibilidade e retrata o comportamento do modelo quando o valor de C_f é alterado.

Tabela 7 – Sensibilidade do modelo 4 à variação de Cf

	C_i	C_r	C_f	k	c	T	$C(T)$
Caso base	75	8	100	15	0	0,218	923,163
					20	0,209	938,937
					40	0,201	953,770
					60	0,194	967,908
					80	0,188	981,161
					100	0,183	993,916
Diminuindo C_f	75	8	80	15	0	0,259	817,047
					20	0,243	836,938
					40	0,230	855,227
					60	0,219	872,233
					80	0,210	888,179
					100	0,203	903,233
Aumentando C_f	75	8	120	15	0	0,191	1017,988
					20	0,185	1031,049
					40	0,180	1043,506
					60	0,175	1055,432
					80	0,171	1066,889
					100	0,167	1077,925

Fonte: O autor (2019)

No que se refere à sensibilidade de T e $C(T)$ à variação no valor de C_f, observa-se que quando C_f aumenta, T diminui. De forma contrária, a diminuição em C_f, provoca um aumento em T, evidenciando a ocorrência do que é logicamente esperado dado a característica da modelagem. Além disso, observa-se que quando C_f aumenta, $C(T)$ aumenta e quando C_f diminui, $C(T)$ diminui, como esperado.

A Tabela 8 mostra a análise de sensibilidade e retrata o comportamento do modelo quando o valor de C_i é alterado.

Tabela 8 – Sensibilidade do modelo 4 à variação de Ci

	C_i	C_r	C_f	k	c	T	$C(T)$
Caso base	75	8	100	15	0	0,218	923,163
					20	0,209	938,937
					40	0,201	953,770
					60	0,194	967,908
					80	0,188	981,161
					100	0,183	993,916
Diminuindo C_i	60	8	100	15	0	0,188	849,153
					20	0,181	861,812
					40	0,175	873,781
					60	0,169	885,160
					80	0,165	896,024
					100	0,161	906,435
Aumentando C_i	90	8	100	15	0	0,248	987,652
					20	0,236	1000,530
					40	0,226	1024,199
					60	0,217	1040,855
					80	0,210	1056,648
					100	0,203	1071,693

Fonte: O autor (2019)

No que concerne à sensibilidade de T e $C(T)$ à variação no valor de C_i, observa-se que quando C_i aumenta, T aumenta e quando C_i diminui, T diminui, como esperado. Além disso, nota-se que quando C_i aumenta, $C(T)$ aumenta e quando C_i diminui, $C(T)$ diminui, também indicando um comportamento logicamente esperado.

A Tabela 9 mostra a análise de sensibilidade e retrata o comportamento do modelo quando o valor de C_r é alterado.

Tabela 9 – Sensibilidade do modelo 4 à variação de Cr

	C_i	C_r	C_f	k	c	T	$C(T)$
Caso base	75	8	100	15	0	0,218	923,163
					20	0,209	938,937
					40	0,201	953,770
					60	0,194	967,908
					80	0,188	981,161
					100	0,183	993,916
Diminuindo C_r	75	6.4	100	15	0	0,216	907,114
					20	0,206	922,631
					40	0,199	937,242
					60	0,192	951,085
					80	0,186	964,264
					100	0,181	976,863
Aumentando C_r	75	9.6	100	15	0	0,221	939,140
					20	0,211	955,180
					40	0,203	970,243
					60	0,196	984,481
					80	0,189	998,011
					100	0,184	1010,925

Fonte: O autor (2019)

Em se tratando da sensibilidade de T e $C(T)$ à variação no valor de C_r, observa-se que quando C_r aumenta, T aumenta e quando C_r diminui, T diminui, como esperado. Além disso, nota-se que quando C_r aumenta, $C(T)$ aumenta e quando C_r diminui, $C(T)$ diminui, também indicando um comportamento logicamente esperado.

A Tabela 10 exibe a análise de sensibilidade e retrata o comportamento do modelo quando o valor de k é alterado.

Tabela 10 – Sensibilidade do modelo 4 à variação de k

	C_i	C_r	C_f	k	c	T	$C(T)$
Caso base	75	8	100	15	0	0,218	923,163
					20	0,209	938,937
					40	0,201	953,770
					60	0,194	967,908
					80	0,188	981,161
					100	0,183	993,916
Diminuindo k	75	8	100	12	0	0,255	802,056
					20	0,242	817,778
					40	0,232	832,476
					60	0,223	846,321
					80	0,215	859,439
					100	0,208	871,927
Aumentando k	75	8	100	18	0	0,193	1034,738
					20	0,186	1050,552
					40	0,179	1065,491
					60	0,174	1079,681
					80	0,169	1093,220
					100	0,164	1106,187

Fonte: O autor (2019)

No que se refere à sensibilidade de T e $C(T)$ à variação no valor de k, observa-se que quando k aumenta, T diminui e quando k diminui, T aumenta, como esperado. Além disso, nota-se que quando k aumenta, $C(T)$ aumenta e quando k diminui, $C(T)$ diminui, também como esperado.

O comportamento do modelo, diante das variações nas mudanças dos parâmetros C_i, C_r, C_f ou k, mostra-se oportuno e condizente com o esperado dado a lógica da modelagem. Assim como nas modelagens anteriormente propostas, as variações T e $C(T)$ mostram-se logicamente aceitáveis, de forma que o modelo consegue inserir o custo relativo ao tempo em estado defeituoso na modelagem *delay time* sem introduzir perturbações inadequadas.

4.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS MODELAGENS PROPOSTAS

As modificações propostas nos modelos *delay time* para componente simples e para sistema multicomponente inserem a possibilidade da inclusão de um custo relativo ao tempo em estado defeituoso de forma simplificada mas mais condizente que a modelagem tradicional para algumas situações práticas.

Nesse sentido, esta dissertação usou como base a situação de perda de eficiência pelo fato do equipamento ou componente está em estado defeituoso e também o aumento do custo de reparo e reciclagem de um item que deve ser reinserido no processo. Essas duas situações representam de forma clara a aplicabilidade prática das modificações propostas como também evidenciam o elevado número de casos em que elas podem ser utilizadas.

De forma geral, os modelos apresentam a possibilidade de uma melhor indicação do período ótimo para realização de inspeção, bem como estabelecem uma representação mais realística do custo, inserindo uma parcela fundamental antes não levada em consideração. Em termos gerenciais, isso representa uma possibilidade do estabelecimento de um período ótimo de inspeção mais adequado, melhor alocação do tempo para o pessoal da manutenção, redução na taxa de falhas e do tempo em estado defeituoso, consequentemente aumentando a eficiência do sistema em análise.

Entretanto, ressalta-se que para a aplicação efetiva na prática, a integração com a metodologia para modelagem da manutenção, também descrita nesta dissertação, pode gerar maiores benefícios, posto que a contextualização do caso real pode inserir minúcias necessárias para uma aplicação mais efetiva, como pode-se observar no tópico a seguir.

4.4 INTEGRAÇÃO COM A METODOLOGIA PREVIAMENTE DESCRITA

Os modelos descritos neste capítulo podem modelar situações em que um componente único ou um sistema com vários componentes passem por um estado defeituoso antes de falhar e a permanência nesse estado tenha um custo associado por unidade de tempo. A aplicação da metodologia proposta no capítulo anterior, pode contribuir tanto para a caracterização do caso em estudo, quanto para a adequação do modelo aos dados da realidade prática, bem como sua posterior análise, validação e implementação da solução.

Com relação à caracterização do caso em estudo, as situações expostas no início deste capítulo representam algumas possibilidades de aplicação da modelagem em contextos práticos. Nesse sentido, a aplicação da primeira fase da metodologia em contextos práticos que envolvam as situações supracitadas pode contribuir para o entendimento do processo, verificando suas vulnerabilidades e características gerais de operação e manutenção; identificar a natureza dos problemas em manutenção, avaliando a causa, a consequência e os meios de prevenção; verificar os principais problemas relacionados ao sistema e comprovar se os modelos desenvolvidos de fato podem servir como representação da realidade específica.

No que concerne à aplicação do modelo a um caso específico, a metodologia pode contribuir no levantamento dos dados subjetivos e/ou objetivos relacionados com a aplicação

do modelo *delay time*; auxiliar na revisão da modelagem proposta; estimar e validar os dados de forma estruturada por meio do auxílio de métodos já consolidados, aplicados ao passo a passo indicado da metodologia proposta; analisar e validar o modelo e; por fim, contribuir com a efetiva solução do problema e posterior implementação da solução.

4.5 IMPLICAÇÕES GERENCIAIS

Em termos gerenciais, a aplicação prática dos modelos propostos não aumenta consideravelmente o esforço administrativo, quando comparado aos modelos tradicionais (modelos considerados bases para o desenvolvimento das 4 propostas de modelagem apresentadas). O não aumento de esforço gerencial é devido principalmente ao fato de apenas o custo relativo ao tempo de permanência em estado defeituoso ser o elemento que difere entre os modelos bases e propostos.

Além disso, a estimação desse custo, quando já se têm informações sobre todos os outros aspectos já previstos na modelagem tradicional, é relativamente simples de se obter, visto que os procedimentos de estimação já foram definidos e possivelmente aplicados para os demais parâmetros de custo. Por isso, não se aumenta a complexidade gerencial com a utilização dos modelos apresentados, em comparação com os modelos tradicionais.

No entanto, cabe ressaltar que existe um aumento de esforço gerencial com relação a não realização de atividade de inspeção, ou seja, quando apenas se realiza manutenções corretivas. Contudo, o aumento no esforço gerencial na utilização de medidas de manutenção planejada, como inspeção de equipamentos, é justificada pela possibilidade de redução significativa nos custos, como já ressaltada nos tópicos 2.1.2 e 2.1.5, que tratam, respectivamente, da classificação e importância da manutenção.

4.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou propostas de inclusão e análise do custo relativo ao estado defeituoso em modelos *delay time* para componente simples e para sistemas multicomponentes. Inicialmente, mostrou-se situações em que o tempo em estado defeituoso pode ser um fator preponderante para a determinação de políticas de manutenção. Em seguida, foram apresentados 4 modelos distintos que inserem ou contabilizam o custo em estado defeituoso na modelagem *delay time.* Por fim, comentou-se sobre a importância da integração entre a metodologia proposta na seção anterior para a efetiva aplicação prática dos modelos propostos.

5 CONCLUSÕES

A modelagem da manutenção teve um desenvolvimento tardio em relação à modelagem da produção. Em países em desenvolvimento como o Brasil, este cenário se acentua por conta da escassez de dados objetivos, da cultura do imediatismo na resolução de problemas, e devido à falta de planejamento adequado das ações de manutenção industrial.

Além disso, os modelos de manutenção existentes algumas vezes não conseguem se adequar à situação prática de aplicação, por não serem uma boa representação da realidade, ou por serem tão complexos e exigirem tantos parâmetros que inviabilizam e desencorajam a aplicação em casos reais.

Dentro desse contexto, esta dissertação teve por objetivo propor uma metodologia que auxilie no desenvolvimento de modelagens em manutenção com maior conformidade aos contextos reais de aplicação, considerando aspectos tanto objetivos quanto subjetivos, e mostrando o passo a passo adequado para o processo de modelagem.

De forma mais específica, buscou-se analisar abordagens de estruturação e elaboração de modelos e propor uma metodologia e seu respectivo *framework* para o desenvolvimento de modelagem em manutenção. Além disso, foram sugeridas modificações para que as modelagens *delay time* para componente único e sistema multicomponente pudessem ser aplicadas em situações as quais o tempo em estado defeituoso é uma parcela relevante para o planejamento da manutenção.

No que se refere ao desenvolvimento de uma metodologia para modelagem em manutenção, tomou-se como base duas metodologias previamente existentes e incorporou-se alguns tipos de abordagens que visam facilitar o entendimento, a formulação e a solução de um problema, além de indicar formas de implementação da solução no contexto real. Nesse sentido, destaca-se a inserção da abordagem *snapshot* a qual permite uma análise mais consolidada da situação operacional da manutenção e viabiliza um melhor entendimento do problema a ser solucionado, além de proporcionar meios de coleta e interpretação de dados objetivos e subjetivos.

A metodologia proposta consta de três fases distintas que permitem caracterizar o problema, formular o modelo matemático, obter a solução e desenvolver uma estratégia para sua implementação prática no contexto real. Essas fases e todas as etapas relacionadas com elas visam contribuir para que o modelo formulado esteja em consonância com o problema existente na prática e que a solução possa de fato contribuir com melhorias efetivas na manutenção.

Por abordar um contexto relacionado ao estudo e entendimento do processo e sistema de um caso específico, além de garantir um bom direcionamento para a formulação de modelos, a metodologia possibilita um guia para o desenvolvimento de estudos de caso em manutenção que visem identificar os problemas existentes em determinado contexto industrial e propor melhorias e possíveis soluções gerenciais e/ou de otimização.

Além disso, dada a abrangência de etapas e o detalhamento das ações a serem seguidas em cada uma delas, a metodologia pode ser usada para o desenvolvimento de estágios específicos no processo de modelagem, por exemplo, na aplicação de um modelo reformulado à um contexto prático ao qual *a priori* parece ser melhor solucionado devido aos ajustes na formatação do modelo.

No que concerne às sugestões de modificação nos modelos *delay time*, a proposta de inclusão do custo em estado defeituoso permite que uma série de contextos práticos passem a ser melhor modelados e analisados por meio de modelos relativamente simples e que não aumentam o nível de complexidade se comparado com a formatação inicialmente proposta. Esse fato contribui para que eles de fato sejam considerados em contextos práticos de aplicação, possivelmente modelando casos reais e contribuindo para um melhor planejamento da manutenção, sobretudo no que se refere aos aspectos relativos à manutenção preventiva de itens por meio da definição de período ótimo de inspeção.

Por fim, ressalta-se a importância da pesquisa nos pontos de vista econômico, social e ambiental. No que se refere ao aspecto econômico, a aplicação da metodologia e das modelagens propostas em contextos reais pode implicar na redução de custos, devido a melhorias significativas no processo e no tempo para a realização de inspeções periódicas. No contexto social, a melhoria dos sistemas que atendem necessidades da sociedade, como o setor industrial, pode facilitar o acesso aos produtos por meio de preços mais acessíveis, devido a um sistema de produção mais eficiente. Em se tratando da perspectiva ambiental, a utilização do modelo 3, que se relaciona com o contexto de reciclagem de itens, pode proporcionar a substituição por itens remanufaturados, diminuindo os impactos ambientais advindos da substituição por um item novo.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Tanto a metodologia quanto as proposições de modificações na modelagem *delay time* foram desenvolvidas com base em concepções teóricas e estruturação lógica para resolução de problemas da realidade cotidiana do planejamento e da aplicação da manutenção industrial.

A metodologia tem uma abrangência mais geral e foi pensada e desenvolvida para englobar os diversos tipos de necessidades de identificação de problemas distintos e formulação de modelo. As modificações no modelo *delay time* tem uma abordagem mais específica e direcionada para um tipo de problema particular que pode ser encontrado em diversos contextos.

Apesar da vasta gama de possibilidades de aplicação, não se teve acesso a um contexto prático industrial para aplicar a metodologia e analisar a possibilidade de aplicação dos modelos propostos na prática. Isso representa uma fragilidade que pode ser sanada em estudos futuros a partir do desenvolvimento de colaborações e parcerias entre a Universidade ou Grupo de Pesquisa com a indústria local.

Nesse sentido, essa inicial fragilidade pode ser convertida em um processo futuro de aproximação entre os setores científico e industrial. A partir da metodologia proposta, pode-se mostrar mais claramente aos representantes das indústrias como uma possível intervenção de uma equipe de pesquisa pode atuar no segmento industrial e contribuir tanto para a caracterização e entendimento das particularidades envolvidas na operação e manutenção como no desenvolvimento de modelagens específicas para solucionar e implementar a solução na prática.

Em termos acadêmicos, no que concerne à possibilidade de novos desenvolvimentos metodológicos, pode-se considerar em trabalhos futuros a incorporação de diferentes estruturas de custo variável de manutenção de um item defeituoso. No que se refere ao desenvolvimento de novos modelos, pode-se modelar, por exemplo, um sistema complexo que cessa seu funcionamento a partir da falha de um certo número de disponistivos *k out of N*.

Ainda no contexto acadêmico, sugere-se o desenvolvimento de aplicativo destinado à aplicação prática da metodologia para modelagem da manutenção e dos modelos propostos em contextos reais.

Por fim, outros trabalhos futuros nesta área do conhecimento podem ser inspirados com base no questionamento apontado por Mesquita e Santoro (2004, p. 66): “Por quê as empresas não utilizam métodos estatísticos e modelos de otimização nos processos de planejamento, programação e controle da produção e estoques?”. A resposta a esta pergunda pode esclarecer o motivo pelo qual a aplicação prática de modelos desenvolvidos na academia é difícil de ser executada.

REFERÊNCIAS

ALBERTI, A. R.; CAVALCANTE, C. A. V.; SCARF, P.; SILVA, A. L. O. Modelling inspection and replacement quality for protection system. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 176, p. 145-153, 2018.

AL-NAJJAR, B. Maintenance impact on company competitiveness and profit. In: LEI, T. V. D.; HERDER, P.; WIJNIA, Y. (Orgs.). **Asset Management**: The State of Art in Europe from a Life Cycle Perspective. Nova York: Springer, 2012, p. 115-141.

ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, H. L.; CAVALCANTE, A. M. confiabilidade e mantenabilidade na manutenção. In: ALMEIDA, A. T.; SOUZA, F. M. C (Orgs.). **Gestão da manutenção na direção da competitividade**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2001, p. 11-41.

ANITYASARI, M.; KASEBERNICK, H.; KARA, S. The role of warranty in the reuse strategy. In CIRP CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING, 14., 2007. **Procedings** […] 2007, p. 335–340.

ASCHER, H.; FEINGOLD, H. **Repairable system reliability**. New York: Marcel Dekker, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 5462:** confiabilidade e mantenabilidade. Rio de Janeiro, 1994.

BAKER, R. D.; CHRISTER, A. H. Reviewing delay-time OR modelling of engineering aspects of maintenance. **European Journal of Operational Research**, v. 73, p. 407-422, 1994.

BAKER, R. D.; WANG, W. Developing and testing the delay-time model. **Journal of Operational Research Society**, v. 44. n. 4, p. 361-374, 1993.

BEN-DAYA, M. Failure statistics. In: BEN-DAYA, M.;DUFFUAA, S. O.; RAOUF, A.; KNEZEVIC, J.; AIT-KADI, D. (orgs.). **Handbook of maintenance management and engineering**. London: Springer, 2009. p. 45-73.

BEN-DAYA, M.; KUMAR, U.; MURTHY, D. N. P. **Introduction to maintenance engineering**: modeling, optimization, and management. Chichester: Wiley, 2016.

BERRADE, M. D. CAVALCANTE, C. A. V. SCARF, P. A. Maintenance scheduling of a protection system subject to imperfect inspection and replacement. **European Journal of Operational Research**, v. 218, p. 716-725, 2012.

BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A. V. A study of postponed replacement in delay time model. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 168, p. 70-79, 2017.

CARTER, A. D. S. **Mechanical reliability**. 2. ed. London: Macmillan, 1986.

CAVALCANTE, C. A. V. **Modelagem de decisão multicritério no planejamento da manutenção abordando problemáticas de escolha e classificação**. 2005. 136 f. Tese

(Doutorado em Engenharia de Produção) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

CHELBI, A.; AIT-KADI, D. Inspection strategies for randomly failing systems. In: BEN-DAYA, M.; DUFFUAA, S. O.; RAOUF, A.; KNEZEVIC, J.; AIT-KADI, D. (orgs.). **Handbook of Maintenance Management and Engineering**. London: Springer, 2009. p. 303-335.

CHRISTER, A. H. Innovatory decision making. In:Proc. NATO conference on role and effectiveness of decision theory in practice, 1976. **Procedings** […] 1976.

CHRISTER, A. H.; WALLER, W. M. Delay time models of industrial inspection maintenance problems. **Journal of the Operational Research Society**, v. 35, n. 5, p. 401-406, maio. 1984.

CHRISTER, A. H.; WHITELAW, J. An operational research approach to breakdown maintenance: problem recognition. **Journal of Operational Research Society**, v. 34, n. 11, p. 1041-1052, 1983.

DAS, A. N.; ACHARYA, D. Age replacement of components during IFR delay time. **IEEE Transactions on Reliability**. v. 53, n. 3, p. 306-312, 2004.

DESA, M. I.; CHRISTER, A. H. Modelling in the absence of data: a case study of fleet maintenance in a developing country. **Journal of the Operational Research Society**, v. 52, n. 3, p. 247-260, 2001.

European Committee for Standardization. **EN 13306:2010:** maintenance – maintenance terminology. Brussels, 2010.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (Orgs.). **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GERTSBAKH, I. **Reliability theory**: with applications to preventive maintenance. Berlim: Springer, 2000.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLDMAN, A. D.; SLATTERY, T. B. **Maintenability**: a major element of system effectiveness. New York: Wiley, 1964.

HALL, T. Valves. In: MOBLEY, R. K.; HIGGINS, L. R.; WIKOFF, D. J. (orgs.). **maintenance engineering handbook**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2008. p. 5.198-5.211.

HICKS, T. G. Piping. In: MOBLEY, R. K.; HIGGINS, L. R.; WIKOFF, D. J. (orgs.). **Maintenance engineering handbook**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2008. p. 9.55-9. 9.89.

JONES, B.; JENKINSON, I.; WANG, J. Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 94, p. 111-124, 2009.

LEE, C. **Applications of delay time theory to maintenance practice of complex plant**. 1999. 222 f. Tese (Doutorado) – Centre for Operational Research and Applied Statistics, University of Salford, Salford, 1999.

LEEMIS, L. **Reliability: probabilistic models and statistical methods**. Nova York: Prentice-Hall, 384p., 1995.

LO, H.; YU, R. A study of quality management strategy for reused products. **Reliability Engineering and System Safety**. v. 119, p. 172-177, 2013.

MARCH, C. Pumps: centrifugal and positive displacement. In: MOBLEY, R. K.; HIGGINS, L. R.; WIKOFF, D. J. (orgs.). **Maintenance Engineering Handbook**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2008. p. 5.213-5.227.

MARCONI, M.A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MENEZES, H. B.; ALMEIDA, A. T. TPM – Manutenção Produtiva Total: da concepção conceitual à implantação. In: ALMEIDA, A. T.; SOUZA, F. M. C (Orgs.). **Gestão da Manutenção na Direção da Competitividade**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2001, p. 92-111.

MESQUITA, M. A.; SANTORO, M. C. Análise de modelos e práticas de planejamento e controle da produção na indústria farmacêutica. **Produção**. v. 14, n. 1, p. 64-77, 2004.

MIRANDA, L. C.; SILVA, A. M. A. Sistemas de custeio para apoio à gestão da manutenção. In: ALMEIDA, A. T.; SOUZA, F. M. C (Orgs.). **Gestão da Manutenção na Direção da Competitividade**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2001, p. 113-133.

MOBLEY, R. K. Introduction to the theory and practice of maintenance. In: HIGGINS, L. R.; MOBLEY, R. K. (Orgs.). **Maintenance Engineering Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2002, p. 1.3-1.10.

MOUBRAY, J. **Reliability-centred maintenance**. 2. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1997.

NAKAGAWA, T. **Maintenance theory of reliability**. London: Springer, 2005.

O'CONNOR, P. D. T.; KLEYNER, A. **Practical reliability engineering**. 5. ed. Chichester: Wiley, 2012.

PHOGAT, S.; GUPTA, A. K. Identification of problems in maintenance operations and comparison with manufacturing operations: a review. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 23, n. 2, p. 226-238, 2017.

PINJALA, S. K.; PINTELON, L.; VEREECKE, A. An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. **International Journal of Production Economics**, v. 104, p. 214-229, 2006.

PINTELON, L.; PARODI-HERZ, A. Maintenance: an evolutionary perspective. In: KOBBACY, K. A. H.; MURTHY, D. N. P. (Orgs.) **Complex System Maintenance Handbook**. Nova York: Springer, 2008, p. 21-48.

RAHIMIFARD, S.; COATES, G.; STAIKOS, T.; EDWARDS, C.; ABU-BAKAR, M. Barriers, drivers and challenges for sustainable product recovery and recycling. **Int. Journal of Sustainable Engineering**. v. 2 n. 2, p. 80-90, 2009.

SANDER, A.; SCHUBERT, G.; JACKEL, H. G. The fundamentals of comminution of metals in shredders of the swing-hammer type. **Int. J. Miner. Process**. v. 74, p. 385-393, 2004.

SCARF, P. A. On the application of mathematical models in maintenance. **European Journal of Operational Research**, v. 99, p. 493-506, 1997.

SCARF, P. A.; CAVALVANTE, C. A. V. Modelling quality in replacement and inspection maintenance. **Int. J. Production Economics**, v. 135, p. 372-381, 2012.

SANTOS, A. C. J.; CAVALCANTE, C. A. V. Insight into cost of defective state using delay-time concept. In: IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability, 10., 2018a, Manchester. **Procedings** […] Manchester: 2018a, p. 141-146.

SANTOS, A. C. J.; CAVALCANTE, C. A. V. Discussão sobre metodologias de análise da gestão da manutenção: da estratégia à operação. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 38., 2018b, Maceió. **Anais** [...] Maceió: 2018b.

SIBIDÉ, I.; KHATAB, A.; CLAVER, D.; AIT-KADI, D. A maintenance optimization model for a second hand stochastically deteriorating system under different operating environments. In: International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT), 3. **Procedings** [...] 2015. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7233136/references#references Acesso em: 06 dez 2018.

SIQUEIRA, I. P.; ALMEIDA, A. T. Otimização da periodicidade da manutenção centrada na confiabilidade. In: ALMEIDA, A. T.; SOUZA, F. M. C (Orgs.). **Gestão da Manutenção na Direção da Competitividade**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2001, p. 249-270.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

US ARMY MATERIAL COMMAND PAMPHLET, **Engineering design handbook:** Maintenance Engineering Techniques, 1975. Disponível em: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a021390.pdf> Acesso em: 16 jan 2018.

WANG, L.; HU, H.; WANG, Y.; WU, W.; HE, P. The availability model and parameters estimation method for the delay time model with imperfect maintenance at inspection. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, p. 2855-2863, 2011.

WANG, W. Subjective estimation of the delay time distribution in maintenance modelling. **European Journal of Operational Research**, v. 99, p. 516-529, 1997.

WANG, W. Delay time modelling. In: KOBBACY, A. H.; MURTHY, D. N. P. (orgs.). **Complex System Maintenance Handbook**. London: Springer, 2008. p. 345-370.

WANG. W. A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the Delay-Time concept. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 96, p. 1535-1541, 2011.

WANG. W. An overview of the recent advances in delay-time based maintenance modelling. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 106, p. 165-178, 2012.

YEH, R. H.; LO, H.; YU, R. A study of maintenance policies for second-hand products. **Computers & Industrial Engineering**. v. 60, p. 438-444, 2011.

YIN, L.; AUTHURS, D.; WRIGHT, S.; SANTAROSSA, L. Fracture and wear in shredder hammer tungsten carbide tips in the sugar cane shredding process. In: **Recent Advances in Structural Integrity Analysis**: Proceedings of the International Congress (APCF/SIF-2014). 2014.

ZHOU, X.; HU, Z.; QIN, X.; HUA, L. Study on the stress characteristic and fatigue life of the shredder pin. **Engineering Failure Analysis**. v. 59, p. 444-455, 2016.

ZWINGELSTEIN, G. C. RCM Approach to maintaining a nuclear power plant. In: BLISCHKE, W. R.; MURTHY, D. N. P. (Orgs.). **Case studies in Reliability and Maintenance**. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003, p. 447-476.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PARA GESTOR DE MANUTENÇÃO

Data: _____/_____/_____

Caracterização do gestor entrevistado:

1. Nome: _____ 2. Idade: _____

3. Formação profissional: _____

4. Cargo: _____ 5. Tempo no cargo: _____

6. Principais atribuições: _____

Caracterização da empresa:

7. Nome: _____ 8. Tempo no mercado: _____

9. Setor de atuação: _____ 10. Número de funcionários: _____

11. Quantidade de fábricas: _____ 12. Variedade (número) de produtos fabricados: _____

Caracterização da planta industrial:

13. Localização: _____

_____ 14. Capacidade produtiva: _____

15. Sistema de produção:

( ) Contínua ( ) Em massa ( ) Lote ( ) Projeto

16. Tipo de arranjo físico:

( ) Posicional ( ) Por processo ( ) Celular ( ) Por produto

17. Número de funcionários na produção: _____ 18. Quantidade ou volume de fabricação: _____

Caracterização do processo:

19. Etapas do processo produtivo e respectiva descrição (se possível anexar fluxograma):

_____

_____

20. Equipamentos críticos e respectiva importância no processo:

_____

_____

21. Atividades manuais críticas:

_____

_____

Perguntas sobre a gestão da manutenção:

22. Qual modelo de manutenção mais utilizado pela empresa (corretiva, preventiva, preditiva, etc.)?

_____

23. Como o setor de manutenção está organizado (centralizado, descentralizado, misto, terceirizado)?

_____

_____

24. Quais sistemas de informação são utilizados para o Planejamento e Controle da Manutenção? Quais aspectos positivos e negativos da sua utilização?

_____

_____

25. A área de manutenção possui indicadores para medir seu desempenho? Quais? Quais são as metas da área de manutenção?

_____

_____

26. A atual estrutura organizacional da manutenção atende às expectativas e à demanda do setor de operação? Existe um alinhamento entre as metas da manutenção e da operação?

_____

_____

27. A empresa avalia e monitora eficazmente os riscos das falhas, de maneira a permitir o melhor planejamento das intervenções de manutenção e maior controle sobre os equipamentos?

_____

_____

28. Ao realizar um investimento em novo equipamento são considerados também os custos de operação e manutenção?

_____

_____

29. Os funcionários têm autonomia para implantar melhorias em manutenção?

_____

_____

Manutenção Preventiva (MP) e Preditiva:

	Pergunta	**Sim**	**Não**
30.	Existe um sistema de inspeção periódica que identifica problemas potenciais antes de se tornarem problemas de tempo de inatividade?		
31.	Listagens de equipamentos e procedimentos de MP são atuais e precisas?		
32.	As inspeções são sempre realizadas exatamente como especificado, quando especificado?		
33.	O trabalho de manutenção preventiva tem a maior prioridade que o trabalho de manutenção corretiva no planejamento de manutenção e no esforço de programação?		
34.	Existem mecanismos para garantir que os procedimentos de manutenção preventiva, que não aconteçam conforme previsto, não sejam esquecidos e ainda sejam feitos?		
35.	A maioria das ordens de trabalho de reparo são geradas a partir de inspeções de manutenção preventiva?		
36.	Quando ocorre uma falha, os procedimentos de MP são revisados e ajustados para evitar que o problema se repita?		
37.	Os procedimentos de manutenção preventiva são revisados e atualizados quando há mudanças em equipamentos ou práticas de operação?		
38.	Existem medidas no local para monitorar o desempenho e os resultados do Processo de Manutenção Preventiva?		
39.	O pessoal operacional é o principal responsável pelo trabalho de manutenção preventiva que é feito enquanto o equipamento está funcionando?		

40. Manutenção preditiva:

Equipamento	Tipo de monitoramento	Características do monitoramento

Observações: _____

Manutenção corretiva:

41. Qual a natureza das falhas mais recorrentes?

( ) Elétrica ( ) Mecânica ( ) Hidráulica ( ) Pneumática ( ) Outra: _____

42. Dado que um equipamento crítico é aquele que uma falha traz consequências mais sérias para o processo. Qual as principais causas de falhas nesse tipo de equipamento? A empresa tem todos os dados de falha devidamente organizados e disponíveis? Se sim, qual tipo de análise é realizado e com que finalidade?

_____

_____

43. As falhas têm trazido consequências relevantes para o sistema de produção, por exemplo, a parada no processo, retrabalho ou perdas consideráveis de materiais? Com que periodicidade as falhas com consequências mais relevantes têm ocorrido?

_____

_____

Observação 1: As questões 23 a 29 foram adaptadas do questionário disponível em: COSTA, M. A. **Gestão Estratégica da Manutenção**: Uma Oportunidade para Melhorar o Resultado Operacional. 2013. 103 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013. Disponível em: <www.ufjf.br/ep/files/2014/07/2012_3_Mariana.pdf > Acesso em: 4 dez 2017.

Observação 2: As questões 30 a 39 foram adaptadas do questionário disponível em: <msi-lean.com/Maintenance_Assessment_Questionnaire.pdf> Acesso em: 4 dez 2017.

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO PARA OPERADOR DE MANUTENÇÃO

Data: _____/_____/_____

Falha

Quem identificou: _____

Equipamento: _____

Componente(s): _____

Hora do diagnóstico: _____

Tempo de reparo: _____

Tempo total de inatividade: _____

Número de pessoas envolvidas na manutenção: ____

Peças necessárias para o reparo:

1: _____

2: _____

3: _____

4: _____

5: _____

6: _____

Disponíveis: _____ Não disponíveis: _____

Natureza da falha:

Elétrica	
Mecânica	
Hidráulica	
Pneumática	
Outra	

Outra: _____

Causa da falha:

Desgaste	
Erro do operador	
Lubrificação	
Projeto do componente	
Sujeira / corpo estranho	
Excesso de vibração	
Utilização acima da capacidade	
Configuração de operação incorreta	
Acidente	
Outra	

Outra: _____

Meios de prevenção:

Não é possível prevenir	
Manutenção preventiva	
Re-projeto de componente	
Melhoramento da prática do operador	
Outra	

Outra: _____

Consequências da falha:

Irrelevante	
Parada no processo de produção	
Retrabalho	
Perdas de material	
Outra	

Outra: _____

Questionamentos sobre o equipamento:	Sim	Não
Equipamento estava em operação		
Equipamento apresentava sinais de defeito		
• Se sim, quais:		
Equipamento funcionava em condições adequadas		
A condição do equipamento pode ser monitorada automaticamente por algum dispositivo		
• Se sim, qual:		
Equipamento já falhou anteriormente		
• Se sim, com que frequência:		
Essa falha pode induzir falha em outro equipamento		

Questionamentos sobre a manutenção:	Sim	Não
Manutenção deve ser feita imediatamente		
Manutenção nesta ação foi terceirizada		
Oportunidade de manutenção em outros equipamentos		

Descrição da falha:

Observações / Sugestões: