

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

EMANUELLY DE ARRUDA MARQUES

**UMA DISCUSSÃO SOBRE OS MODELOS QUE INCORPORAM ERRO HUMANO
NA REALIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO**

RECIFE
2017

EMANUELLY DE ARRUDA MARQUES

**UMA DISCUSSÃO SOBRE OS MODELOS QUE INCORPORAM ERRO HUMANO
NA REALIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, para a obtenção do grau de Mestre.

Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante, Dsc.

RECIFE
2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

M357d Marques, Emanuely de Arruda.

Uma discussão sobre os modelos que incorporam erro humano na realização da manutenção / Emanuely de Arruda Marques. – Recife, 2017.

66f., il., figs., gráfs. e tabs.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2017.

Inclui Referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Manutenção imperfeita. 3. Erro humano. 4. Inspeção. 5. Instalação. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virgínio (Orientador). II. Título.

658.5 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2017/ 344

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO ACADÊMICO DE

EMANUELLY DE ARRUDA MARQUES

*“UMA DISCUSSÃO SOBRE OS MODELOS QUE INCORPORAM ERRO HUMANO NA
REALIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO”*

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera a candidata **EMANUELLY DE ARRUDA MARQUES, APROVADA.**

Recife, 31 de agosto de 2017.

Prof. CRISTIANO ALEXANDRE VIRGÍNIO CAVALCANTE, Doutor (UFPE) (Orientador)

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA FILHO, Doutor (UFPE)

Prof. DANIEL CARVALHO DA CUNHA, Doutor (UNICAMP)

Aos meus pais, Edilene Cavalcante e Manoel Marques, e a meu sobrinho Emanuel Marques pelo incentivo, amor incondicional e confiança, em mim depositados.

E principalmente a Deus, por me proteger, guiar meus caminhos e a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Não posso traduzir em palavras toda a gratidão que sinto neste momento, mas gostaria de manifestar meu profundo agradecimento a todos que contribuíram para a conclusão desta etapa da minha vida, materializada no presente trabalho.

Inicialmente agradeço a Deus, a força suprema sobre todas as coisas, pela vida, por estar sempre comigo como minha fortaleza, meu sustento e salvador.

Aos meus pais, Edilene Cavalcante e Manoel Marques, que me incentivaram nessa jornada e me deram exemplos maravilhosos de como ser uma pessoa de valor para a sociedade.

A meus amigos, Lucas Frederico, Ricardo Lopes, Renan Viegas e Sharlene Neuma, que me acompanharam por esse caminho e que me ajudaram a crescer como pessoa. A Dona Vilma, Derlyana e Paulo, que se tornaram minha família de Recife.

Ao Prof. Dr. Cristiano Cavalcante, por quem tenho profunda gratidão pela compreensão, paciência, pelas orientações acadêmicas para o desenvolvimento deste trabalho e principalmente por sua motivação, que está contribuindo não só para o meu crescimento profissional, como também para meu crescimento como pessoa. E, por fim, quero agradecer à instituição a qual estive vinculada (Universidade Federal de Pernambuco), a todos os professores que compõem o PPGEF e aos meus amigos do laboratório Random.

“A única maneira de fazer um bom trabalho é amando o que se faz. Se você ainda não encontrou o que ama fazer, continue procurando, não se acomode. Assim como tudo que diz respeito ao coração, você saberá quando tiver encontrado.”

Steve Jobs

RESUMO

Inicialmente, a ação da manutenção era vista como um mal necessário, onde sua função se resumia ao “quebrou, conserta”, mas com o passar dos anos, ganhou visibilidade e a sua importância, passou a ser associada também, a conservação do estado funcional de um item. Na atualidade, a função da manutenção pode estar associada desde ao reestabelecimento de um item, até mesmo a função estratégica dentro de uma organização. Diante disso, os modelos de manutenção podem descrever as possíveis decisões, a respeito das ações de manutenção que melhor ajudarão a atingir um determinado objetivo. Independentemente de como a manutenção foi ou é vista, sua execução se dá pela ação direta ou indireta do homem, e como esse último é passível de falhas, as ações executadas por ele também são. Nesta situação, tem-se a importância de incorporar, a possibilidade de erro humano em modelos matemáticos de manutenção, principalmente quando o erro apresentar significância, frequência ou quando houver componentes advindos de populações heterogêneas. Sendo assim o presente trabalho tem como foco reunir trabalhos que consideram a inserção de erros humanos em modelos de manutenção, como uma forma de validar a importância de considerar o erro humano na elaboração desses modelos. O trabalho também conta com a aplicação da política *KIT* em um estudo de caso onde não se consideram inspeções, de modo a analisar os efeitos de se considerar uma ou outra política.

Palavras chaves: Manutenção imperfeita. Erro humano. Inspeção. Instalação.

ABSTRACT

Initially, the maintenance actions were considered a necessary evil, that function was summarized in “if it is broken, fix it”, but, through the year, obtained visibility and your importance was associated to the item functional state conservation. At present, maintenance function can be associated to the reestablishment of an item to the strategy function inside a company. At that, maintenance models can describe the possible decisions related to actions that will help to achieve an objective. Independently of how maintenance was or is seen, the execution happens by the direct or indirect action of man, and how humans are subject to failure, the actions made by them too. In this situation, it is important to incorporate the possibility of human error in mathematics maintenance models, specially, when the error presents significance, frequency or when components comes from heterogeneous population. Thus, this work focuses in a paper's to gather that considers insertion of human error in maintenance models, to validate the importance of this in the elaboration of these models. The paper also contains an *KAT* policy application in a case study where it is not considered an instrument in order to analyze the effects of considering one or another policy.

Keywords: Imperfect maintenance. Human error. Inspection. Installation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Classificações da manutenção	20
Figura 2.2 – Inspeção perfeita.....	28
Figura 2.3 – Inspeção imperfeita	28
Figura 2.4 – Os tipos de atos inseguros	29
Figura 3.1 – Política $M_1T_1 + M_2T_2$	36
Figura 3.2 – Representação do <i>Delay Time</i>	40
Figura 3.3 – Fase “ <i>burn in</i> ” representada através de inspeções K e seus intervalos Δ	42
Figura 3.4 – Estado de funcionalidade do sistema.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relação entre os tipos básicos de erros e o modelo SRK.....	31
Tabela 3.1 – Classificação do estado do sistema e inspeção, com probabilidades associadas	35
Tabela 3.2 – Resultado da manutenção pela fabricante original do equipamento.....	38
Tabela 3.3 – Resultado da manutenção feita pela própria equipe da empresa.....	39
Tabela 3.4 – Custo e proporção dos componentes fracos de cada fornecedor.....	43
Tabela 3.5 – Política ótima para vários valores de parâmetros comparáveis e modelo de falha com componentes produzidos pelo fornecedor A e pelo fornecedor B.....	45
Tabela 3.6 – Políticas de custo mínimo em função do número de inspeções K para vários p e q	46
Tabela 3.7 – Política de inspeção ótima.....	49
Tabela 4.1 – Custos e idade ótimos para a política de substituição por idade para $C_f = 300$ e diferentes valores de C_p	54
Tabela 4.2 – Aplicação da política $K\Delta T$ para $C_f = 300$	55
Tabela 4.3 – Custos e idade ótimos para a política de substituição por idade para $C_f = 400$ e diferentes valores de C_p	55
Tabela 4.4 – Aplicação da política $K\Delta T$ para $C_f = 400$	56
Tabela 4.5 – Custos e idade ótimos para a política de substituição por idade para $C_f = 500$ e diferentes valores de C_p	56
Tabela 4.6 – Aplicação da política $K\Delta T$ para $C_f = 500$ e C_p variando de 25 – 100.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	Metodologia	13
1.3	Estrutura do trabalho	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	O histórico da manutenção segregado em três contextos	15
2.1.1	Manutenção	16
2.1.2	Classificação dos tipos de manutenção	19
2.1.3	Outras classificações da manutenção	21
2.1.4	Definições importantes associadas à manutenção	22
2.2	Políticas de manutenção	24
2.2.1	Tipos de políticas de manutenção.....	24
2.3	Modelos de manutenção	25
2.4	Manutenção imperfeita	27
2.4.1	Inspeção imperfeita.....	27
2.5	Falha humana	29
2.5.1	Os tipos de falhas humanas	29
2.5.2	Níveis de classificação dos erros humanos	31
2.5.3	A incidência de erros humanos em sistemas com alta tecnologia.....	31
3	CONSIDERAÇÕES SOBRE O ERRO HUMANO EM MODELOS DE MANUTENÇÃO	34
3.1	Erro de julgamento na inspeção para sistema em dois estados	34
3.2	Política KAT	40
3.2.1	Introdução de defeitos na inspeção para sistemas em três estados.....	42
3.3	Inspeção e substituição imperfeita em sistema principal considerando a política MT	48
4	APLICAÇÃO DA POLÍTICA KAT	52
4.1	Pressupostos da política KAT	52
4.2	Fórmulas utilizadas na política KAT	53
4.3	Comparação dos resultados da aplicação da política de substituição por idade com a política KAT para vários valores de C_f e C_p	54
5	CONCLUSÃO E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, a manutenção não é vista apenas como a solução de problemas, mas também como um diferencial competitivo no contexto organizacional, todavia, nem sempre foi assim. No passado, ela era vista como um “mal necessário” (BELHOT & CAMPOS, 1995), uma visão que passou por mudanças até chegar aos dias atuais. Independentemente da época, a manutenção é uma atividade que esteve, está e provavelmente sempre estará profundamente ligada ao homem, seja de forma direta ou indireta. Logo, o homem é um ser passível de falhas, sendo assim, as atividades executadas por ele também o são.

As consequências acerca do erro humano na manutenção dependem de fatores que nem sempre são de responsabilidade da equipe de manutenção, mas que podem influenciar na condução de um erro e também podem gerar diversos efeitos, como: paradas inesperadas no processo produtivo e desperdício de vida útil do componente, as quais podem resultar em um aumento dos custos e até mesmo desencadear um acidente, que é uma das suas piores consequências. Para Okoh (2015), nas últimas décadas, a manutenção deficiente contribuiu para desencadeamento de vários acidentes no setor industrial (OKOH, 2015). Reason & Hobbs (2004) completam afirmando que o risco de erro em manutenção jamais pode ser totalmente eliminado, entretanto, ele pode ser gerenciado com mais eficiência.

A manutenção é de extrema importância e ganha uma maior atenção quando é feita de forma duvidosa e isso acarreta algum infortúnio. No mesmo instante, ela passa a ser o centro das atenções, podendo ser vista estampada em capas de jornais e revistas (BENNET, 2004). Porém, ainda que uma má execução da manutenção não cause um acidente, pode gerar outros tipos de consequências, como: aumentar os custos de produção, danificar o equipamento, desperdiçar vida útil de um componente, entre outros. Se por um lado, a manutenção pode auxiliar na preservação tanto de sistemas como de barreiras de segurança, e, assim, contribuir para a prevenção de acidentes e de outros infortúnios; por outro lado, ela pode ser a porta de entrada para o desencadeamento de um acidente (OKOH & HAUGEN, 2013a).

Como intuito de reduzir o erro humano na manutenção, são inseridas novas tecnologias nessa atividade. No entanto, elas trazem consigo preocupações associadas a erro humano (REASON & MADDOX, 1995), pois novas tecnologias exigem também novas habilidades e treinamento por parte do homem, e essas podem contribuir para novos erros (PERROW, 1999; LATORELLA & PRABHU, 2000).

A manutenção gera muitos custos para as indústrias. Só nos Estados Unidos são gastos U\$240 bilhões com a manutenção corretiva de falhas crônicas de máquinas, sistemas e

peessoas (DHILLON & LIU, 2006). O pior efeito que uma falha na manutenção pode resultar, é um acidente, e o principal aspecto responsável por isso são suas consequências, as quais estão relacionadas ao número de vítimas, aos efeitos do acidente a curto e longo prazo, para população e para o meio ambiente, aos custos financeiros decorrentes dos acidentes, sejam eles relacionados a indenizações pagas às vítimas ou a familiares das vítimas, custo com o bem que foi acidentado, além do abalo na reputação da empresa.

Diante de todas essas consequências, estudar a ação da manutenção, principalmente a manutenção preventiva, é de extrema importância e pode corroborar na diminuição dos riscos de acidentes e dos efeitos provocados pelos mesmos.

Partindo da premissa de que a manutenção é uma das principais atividades dentro de uma organização e que está profundamente relacionada a interação com o homem, tem-se a importância do estudo acerca de modelos que consideram a ação e erro humanos na sua formulação. O desvio da ação correta da manutenção pode estar agregado às mais variadas consequências.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

- Investigar as implicações de considerar o erro humano nos modelos de manutenção apresentados em Scarf *et al.* (2009), Berrade *et al.* (2012) e Berrade, Cavalcante & Scarf (2012), aqui chamados de modelos *KAT*, modelo MT e modelo de duas fases $M_1T_1+M_2T_2$.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Reunir os diferentes tipos de erros na manutenção;
- Identificar quando considerar o erro humano no modelo;
- Comparar os indicadores de desempenho dos modelos que consideram e dos que ignoram erros humanos na manutenção;
- Desenvolver comentários sobre as consequências dos erros humanos na manutenção;
- Sugerir caminhos para tratar o erro humano na manutenção.

1.2 Metodologia

Metodologia (ou método científico) pode ser descrita como um conjunto de técnicas e ferramentas intelectuais adotadas para atingir o conhecimento (GIL, 1995). Cervo, Bervian &

Silva (2007) complementam essa ideia, declarando que a metodologia é uma lógica geral, utilizada para respaldar os méritos de uma pesquisa.

Uma parte muito importante neste trabalho é a revisão da literatura, pois a partir dela é possível obter o arcabouço que justifica a relevância do estudo sobre erro humano e manutenção imperfeita com inserção de defeitos. Para Cervo, Bervian & Silva (2007) essa revisão pode ser feita de forma independente.

O presente trabalho visa fornecer uma revisão de literatura sobre modelos envolvendo manutenção que contemplam o fator humano, para melhor entender o estado da arte sobre o tema, além de contar com uma aplicação de uma política de manutenção em um estudo de caso, através da qual foi possível demonstrar a importância da consideração de inspeções em uma política onde originalmente não se considerou inspeções.

Dessa forma, o presente trabalho é classificado como uma pesquisa aplicada, no que se refere à sua natureza, dada a necessidade de inserção de erros humanos em modelos de manutenção.

Quanto aos objetivos, a pesquisa encontra-se na categoria explicativa, pois procura identificar e analisar as implicações dos erros humanos em modelos de manutenção. Além disso, é utilizado o método de análise comparativa, através de comparações de modelos com o pressuposto de erro humano e sem esse pressuposto.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos: Introdução; Referencial teórico e Revisão bibliográfica; Considerações sobre o erro humano em modelos de manutenção; Aplicação da política *KAT* e Conclusão e proposição de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA

A finalidade deste capítulo é apresentar as bases teóricas que fundamentam esta pesquisa. Inicialmente, apresenta-se o histórico e a relevância da manutenção, assim como sua crescente importância ao longo dos anos. Em seguida, expõem-se as políticas e modelos no contexto da manutenção. Na sequência, exibe-se o erro humano e sua relação com a manutenção.

2.1 O histórico da manutenção segregado em três contextos

Até pouco tempo atrás, a manutenção era vista como um “mal necessário” à indústria (BELHOT & CAMPOS, 1995). Essa visão, segundo Xenos (1998), ainda acompanha algumas indústrias, em que elas consideram as atividades de manutenção como uma “dor de cabeça sem solução”. Para Alsyouf (2007), além de a manutenção não ser mais considerada como um mal necessário, ela pode ser vista como uma estratégia geradora de lucros.

Dentro do contexto da manutenção como um mal necessário, ela era considerada apenas um componente adicional de custos totais da indústria (BELHOT & CAMPOS, 1995). Essa época precedeu à Segunda Guerra Mundial, e Slack (1993) a definiu como a primeira geração da manutenção, em que, até então, a manutenção corretiva predominava dentro das indústrias.

De acordo com Alves & Farsarella (2009), que apresentam uma visão semelhante à de BELHOT & CAMPOS (1995), algumas indústrias ainda permaneceram na fase da primeira geração da manutenção, época na qual a função da manutenção era reduzida a reparar ou restabelecer itens após a sua quebra, ou seja: quebrou, conserta.

Por volta das décadas de 50 e 60, com o desenvolvimento da Engenharia da Confiabilidade, surgiu o conceito de manutenção preventiva, que tem como função agir para evitar a quebra, ou ainda, antecipar-se ao problema, executando ações para evitar que a quebra ocorra. Esse período deu início à segunda geração da manutenção, o que ocorreu em virtude da percepção de que os custos embutidos em uma manutenção corretiva superavam os custos de uma manutenção planejada. Outro fator importante nessa segunda geração da manutenção foi o surgimento da necessidade de controlar os períodos de intervenção da manutenção, os quais refletiam na disponibilidade dos equipamentos para a produção (SLACK, 1993; SLACK, CHAMBERS & JOHNSTON, 2002). Essa geração resultou em um aumento da produtividade que foi de grande importância na época.

Com o passar do tempo e a intensificação da automação, surgiram novas necessidades, e, com elas, novos métodos de se planejar tanto a manufatura como a manutenção, e foi esse o impulso para a terceira geração da manutenção, a qual é marcada pela necessidade do crescimento acerca da confiabilidade dos equipamentos. Para esse fim surge a manutenção preditiva, com análises comportamentais dos equipamentos, as quais possibilitavam uma maior precisão para efetuar a manutenção antes da falha ocorrer e utilizando o máximo possível da vida útil dos equipamentos (NEPOMUCENO, 1985). Essas três gerações da manutenção representam uma classificação geral da manutenção, que é apresentada com mais detalhes na seção 3.1.2.

Para Cavalcante & Almeida (2005), as ações de manutenção têm sofrido mudanças nos últimos tempos, ocorridas em virtude do aumento da complexidade nos diversos sistemas de produção e da inserção da automação nos mesmos. Os autores enfatizam a importância da manutenção, a fim de mantê-los em níveis de performances desejados, reduzindo as paradas não planejadas e os altos custos provenientes destas.

Alguns autores definem a manutenção como ações técnicas, administrativas e de gestão, que têm como finalidade preservar ou restaurar a vida útil de um bem, de modo que o mesmo volte à condição requerida. No contexto industrial, a manutenção é responsável pela preservação das camadas de segurança existentes nos sistemas e, quando executada da forma ideal, auxilia na prevenção de acidentes. Porém, se for feita de forma incorreta, retardada, insuficiente ou excessiva, pode tornar-se o fator causal ou desencadeante para um cenário de grandes acidentes (HOLLNAGEL, WOODS & LEVESON, 2006; OKOH & HAUGEN, 2013a; OKOH & HAUGEN, 2013b).

Moubray (1997) acrescenta que a falha de equipamentos decorrentes da ação da manutenção teve um papel importante em grandes acidentes e incidentes no contexto industrial, e isso proporcionou à manutenção um papel de destaque nas organizações. O autor cita ainda que grandes acidentes no setor industrial – Amoco Cadiz, Chernobyl, Bhopal e Piper Alpha – tiveram como fatores desencadeantes, atividades associadas à manutenção.

A partir do que foi esclarecido sobre a execução indevida da manutenção e unindo isso à frequência com que são feitas as intervenções de manutenção nas indústrias e, ainda, considerando as consequências provocadas por ela, tem-se a importância de se estudar o tema.

2.1.1 Manutenção

Para Alves & Farsarella (2009) a manutenção ao longo dos anos vem ocupando um papel de destaque nos mais variados setores – industrial; hospitalar e de transportes – e esse

destaque deve-se, em parte, à possibilidade de a manutenção apresentar-se como um diferencial competitivo, principalmente no setor industrial. O diferencial competitivo incorporado pela manutenção, mais precisamente pela sua gestão, faz com que as organizações a visualizem no papel de uma função estratégica. Isso ocorre devido ao potencial de aumento da produtividade, que é associado a ela (SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007). O estudo da manutenção como diferencial competitivo não é o foco do trabalho. Para uma maior compreensão a respeito do assunto, recomenda-se Alves & Farsarella (2009). Porém, é importante que fique claro o amplo papel acerca da manutenção dentro de uma organização.

Diante do que foi dito, pode-se entender que a gestão da manutenção está relacionada à produtividade em uma organização, pois, através dela, podem-se gerar melhorias na confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos. Estes, por sua vez, podem contribuir para a diminuição dos custos e o aumento da competitividade dentro as organizações. Para Bogonovo, Marseguerra & Zio (2000), a gestão eficiente da manutenção, através de uma estratégia/política de manutenção adequada, contribui para a efetividade das organizações. Essa contribuição é devida à redução de falhas. No entanto, se a política for inadequada, pode resultar em falhas, que conseqüentemente aumentam os custos do processo e podem comprometer a produção (CHUNG *et al.* 2009).

O conceito de manutenção passou por uma evolução dentro dos parâmetros da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), desde a primeira vez que foi mencionada na norma, em 1975, até a atualmente utilizada, Norma Brasileira (NBR) 5462, de 1994, ano de sua última revisão. Na referida NBR, consta que manutenção é “a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida” (ABNT, 1994). Para Xenos (1998) significa fazer o que for necessário para certificar que um item continue a desempenhar as funções para as quais foi projetado, em um nível de desempenho exigido.

Há pouco tempo, Cavalcante & Fleury (1999) defenderam que o objetivo da manutenção não era apenas garantir a continuidade operacional do item, aumentando a disponibilidade e a confiabilidade dos mesmos, mas, sim, fazer tudo isso de modo a preservar a integridade do homem e do meio ambiente ao menor custo possível.

Diante das definições pesquisadas, é possível perceber um novo conceito acerca da manutenção, no qual ela deixa de ser um “mal necessário” e passa a desempenhar um papel estratégico indispensável nas indústrias (SANTOS, COLOSIMO & MOTTA, 2007). Isso é

reflexo da atual e constante busca pela qualidade e produtividade nas indústrias, o que faz com que a manutenção seja um diferencial (ALVES & FALSARELLA, 2009).

Esse novo conceito da manutenção é compartilhado por Almeida & Souza (2001), que concluem que as organizações, visando aumentar sua competitividade através de melhorias na manutenção de seus equipamentos, têm buscado programas de manutenção como, por exemplo, a Manutenção Produtiva Total, a Manutenção Centrada em Riscos e a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC). Por conta da abordagem racional e sistemática, esses programas permitem que as empresas alcancem excelência nas atividades de manutenção, através da ampliação da disponibilidade e redução dos custos associados a acidentes, defeitos, reparos e substituições. Logo, a função manutenção dentro de uma organização consiste em um sistema de produção, cujo produto se caracteriza como um serviço, geralmente fornecido à função produção, e deve ser gerenciada como qualquer sistema de produção.

A MCC foi desenvolvida primeiramente na indústria aeronáutica, na qual apresentou reduções significativas nos custos; mais tarde foi implementada em indústrias nucleares, *offshore* e em muitas outras, onde também apresentou resultados positivos como o aumento da disponibilidade dos sistemas (RAUSAND, 1998).

Para Fogliatto & Ribeiro (2009), a MCC tem se mostrado um caminho eficiente para tratar questões de manutenção; podendo ser definida como uma técnica que utiliza manutenção preventiva e preditiva de forma otimizada, visando a melhorar a eficiência do equipamento e minimizar os custos de manutenção, apresentando resultados em longo prazo.

Reason (2000) caracteriza a importância da manutenção, afirmando que nada feito pelo homem é indestrutível, porém, se realizadas atividades de manutenção necessárias, pode-se restabelecer a capacidade produtiva, de forma que essa capacidade se equipare à sua inicial. Entretanto, para Okoh (2015), a finalidade da manutenção não deve ser limitada apenas à ideia de restauração/restabelecimento de um item; além desses, ela também pode contribuir para melhorar o entendimento acerca do sistema, assim como da gestão interdisciplinar que pode agregar benefícios a toda organização. Ainda em concordância com o autor, a manutenção pode ser investigada como um fator contribuinte para a robustez e resiliência das organizações, através do desenvolvimento da sua capacidade de prevenir ou diminuir eventos inesperados. Uth (1999) também considera que “a manutenção desempenha um papel importante na prevenção de acidentes”.

Diante do que foi apresentado, torna-se claro que a manutenção possui um alto potencial de contribuição para o aumento do desempenho nas indústrias, principalmente se

considerada sua integração com a função produção e o que foi mencionado com relação ao seu processo evolutivo.

2.1.2 Classificação dos tipos de manutenção

Para Pham & Wang (1996), a partir de uma visão macro, a manutenção pode ser subdividida em dois grandes grupos: manutenção corretiva e manutenção preventiva, em que o primeiro grupo está limitado a efetuar ações de manutenção após ocorrer a falha no sistema e o segundo diz respeito a qualquer ação da manutenção quando o sistema está operante. Numa visão um pouco mais detalhada, Dhillon & Liu (2006) e Xenos (1998) classificam a manutenção em três tipos:

Manutenção Corretiva – esse tipo de manutenção é feita após o item/equipamento apresentar a falha e tem o intuito de restaurar a capacidade funcional para um estado definido.

Manutenção Preventiva – são todas as ações realizadas dentro de um cronograma pré-determinado, periódico e específico que têm como finalidade manter um item/equipamento em condições de trabalho, visando a evitar a falha. Ela envolve tarefas como inspeção, reformas e trocas de peças, que se pré-estabelecidas por recomendação do fabricante, têm a finalidade de otimizar o funcionamento do equipamento;

Manutenção Preditiva – está relacionada ao acompanhamento periódico de itens/equipamentos, por meio da utilização de métodos de medição e de processamento de sinal, com a finalidade de identificar com precisão a condição de operação do item, permitindo, assim, a otimização da utilização de vida útil do item. Esse tipo de manutenção faz parte da manutenção preventiva;

No entanto, existem outros tipos de manutenção que ainda não foram abordados, mas estão entrelaçados aos que foram mencionadas e estão apresentadas na Figura 2.1. É importante salientar que as manutenções preventiva e preditiva compõem a manutenção planejada, que, por sua vez, pode ser descrita como: qualquer ação associada à manutenção, cuja função é anteceder a deterioração do equipamento com a finalidade de prolongar sua vida útil (CAVALCANTE & ALMEIDA, 2007).

Assim sendo, torna-se nítida a importância da manutenção planejada/programada, pois pode aumentar a vida útil de um componente e diminuir a quantidade de interrupções na produção, reduzindo, então, os custos associados às paralisações. Devido a essa importância, Wang (2012) constata que vários estudos direcionaram seu foco para o desenvolvimento de modelos e políticas para otimizar os indicadores de performance, através do melhoramento da manutenção em plantas industriais.

Alguns dos estudos compreendem: o modelo de inspeção baseado na substituição de componentes com qualidade heterogênea por Scarf & Cavalcante (2012); Berrade, Cavalcante & Scarf (2012) propõem um modelo de inspeção e substituição para um sistema de proteção sujeito a erros falso positivo e falso negativo e Deloux, Castanier & Bérenguer (2009), uma política de manutenção preditiva para sistemas de deterioração gradual sujeito a estresse.

A manutenção preventiva começou a ser aplicada a partir de 1950, mas apenas 20 anos depois, com o surgimento da Manutenção Preditiva (Manutenção Baseada na Condição), começam a ser considerados os sintomas de falhas apresentados pelos equipamentos. Esses sintomas são identificados por meio de técnicas de monitoração ou diagnósticos, que resultam em uma maior precisão do momento certo para se efetuar a manutenção (ALVES & FARSARELLA, 2009).

Figura 2.1 – Classificações da manutenção



Fonte: adaptado de Mishawka & Olmedo (1993)

A classificação apresentada por Mishawka & Olmedo (1993) pode ser melhor compreendida, substituindo os termos Preventiva por **Planejada** e Sistemática por **Preventiva**. Assim o grupo Manutenção Planejada é composto pelas manutenções Preventiva, Condicional e Preditiva. A seguir serão descritas apenas as manutenções que ainda não foram feitas.

Manutenção Condicional – Este tipo de manutenção é realizado de acordo com o estado do equipamento e é executada em peças dos itens que se encontrem em mau estado. Isto é, trata-se de um tipo de manutenção que compreende as ações de manutenção que são desencadeadas ao se atingirem valores críticos de parâmetros associados ao funcionamento do equipamento e que refletem o seu estado, exigindo assim a vigilância periódica ou permanente dos equipamentos (MACHADO, 2013).

Manutenção Melhorada – É um tipo de manutenção corretiva que inclui modificações ou alterações destinadas a melhorar o desempenho dos equipamentos, ajustá-los a novas condições de funcionamento ou reabilitá-los às suas características operacionais (NANCABÚ, 2011).

A manutenção, na sua generalidade, é algo indispensável ao processo industrial, mas o que a colocou em evidência foi o fato de que qualquer interrupção feita na produção pode causar grande ônus para a indústria (XENOS, 1998). O período pós Segunda Guerra Mundial impulsionou o aumento da demanda por novos produtos químicos, o que conduziu ao desenvolvimento e expansão do complexo químico industrial, com isso, cresceu a preocupação com os custos gerados pelas paradas inesperadas para manutenção, o que exaltou sua relevância com o passar dos anos (HAGUENAUER, 1986).

Independente do tipo de manutenção – corretiva; preventiva; ou preditiva – qualquer delas está suscetível a erros, uma vez que é realizada pelo homem. Ainda que de forma direta ou indireta, ou ainda que seja empregada alta tecnologia em uma ação de manutenção, ela ainda estará suscetível a ocorrência de um erro humano.

Na sequência, serão apresentadas outras classificações relacionadas à manutenção, assim como seus principais conceitos e algumas causas associadas.

2.1.3 Outras classificações da manutenção

De acordo com Pham & Wang (1996), a manutenção também pode ser classificada em duas grandes categorias: manutenção corretiva e manutenção planejada, em que a primeira ocorre após a falha do sistema e a segunda ocorre quando o sistema está operante, de modo a evitar a falha. Os autores também classificam a manutenção de acordo com o grau de restabelecimento do item após a manutenção:

- Manutenção Perfeita – É a ação da manutenção que recupera a função do sistema para tão boa quanto nova;
- Manutenção Mínima – É aquela que restaura a função do sistema para o período anterior à falha, apresentando-se da mesma forma de antes;
- Manutenção Imperfeita – Tem a função de restaurar o funcionamento do sistema para um estado entre tão bom quanto novo e tão ruim quanto velho;
- Manutenção Danosa – É aquela que, após ser efetuada, aumentará a taxa de falha ou idade do sistema, no entanto, não ocorre quebra;
- Manutenção Desastrosa – É aquela que, após sua ação, ocorre inevitavelmente a quebra do sistema.

Essa classificação pode ser utilizada, tanto para manutenção preventiva como corretiva, já que ambas podem ser feitas de forma: perfeita; mínima; imperfeita; danosa e desastrosa (PHAM & WANG, 1996).

Acerca dessa última classificação da manutenção, Brown & Proschan (1983) indicam algumas causas que podem estar relacionadas à manutenção imperfeita, danosa ou desastrosa:

- Reparo da peça errada;
- Reparo parcial da peça defeituosa;
- Reparo da peça defeituosa e dano em peças adjacentes;
- Inspeção incorreta sobre a condição da unidade; erro de julgamento.
- Executar a manutenção em desconforme com o procedimento de manutenção;
- Falhas não detectadas durante a manutenção;
- Ajustes errados e introdução de dano na manutenção;
- Utilização de peças defeituosas na substituição.

Destaca-se que o presente trabalho tem como foco a análise das causas: erro de julgamento em inspeção; introdução de defeitos decorrentes da inspeção e erros de instalação que afetam a vida do componente associados ao impacto que eles podem causar em sistemas principais e de prontidão.

2.1.4 Definições importantes associadas à manutenção

O contexto da manutenção utiliza termos técnicos que necessitam de uma definição para melhor compreensão deste trabalho, já que alguns dos termos serão regularmente utilizados ao longo do texto.

As definições em sequência foram extraídas da ABNT da NBR 5462/1994.

- Disponibilidade – É a capacidade de um item apresentar-se em condições de executar uma determinada função durante um intervalo de tempo definido;
- Confiabilidade – É a capacidade de um item desempenhar uma função requerida, sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo;
- Manutenibilidade – É a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condição de executar suas atribuições específicas de uso;
- Item – É caracterizado como qualquer parte, componente, dispositivo, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente;

-
- Defeito – Pode ser descrito como qualquer desvio na característica de um item em relação aos seus requisitos, no entanto, esse desvio não cessa a capacidade de o item desempenhar sua função requerida;
 - Falha – Pode ser entendida como o fim da capacidade de um item desempenhar a função requerida;
 - *Delay Time* – É caracterizado como o tempo decorrido entre a chegada de defeito e a eclosão da falha (CHRISTER, 1999);
 - Inspeção – Consiste em uma lista de verificação a respeito da funcionalidade de um componente/sistema/planta. A partir dela, é possível identificar se há necessidade de efetuar outras intervenções, a fim de reduzir a possibilidade de ocorrer uma falha (WANG, 2009);
 - Sistema Principal – É um tipo de sistema caracterizado por apresentar seu estado funcional no modo operacional, em período regular. Essa característica faz com que o estado falho seja facilmente identificado pela descontinuação de sua funcionalidade. Smith & Harris (1992), NASA (2013) e Vinnem, Haugen & Okoh (2016) tratam sobre acidentes que ocorreram devido a manutenções incorretas em sistemas principais;
 - Sistema de Prontidão – São sistemas que permanecem em estado inativo – *stand-by* – em período regular (JIA & CHRISTER, 2002) e são ativados apenas sob demanda, que pode ser, por exemplo, em caso de emergência (BERRADE, CAVALCANTE & SCARF, 2012). Em conformidade com os últimos autores, o estado funcional desse tipo de sistema pode ser bom ou falho, no entanto, só é identificado por meio de inspeção. A emergência que resulta na ativação do sistema de prontidão pode se dar através de uma situação em que o sistema principal esteja em manutenção, cabendo ao sistema de prontidão executar a função do principal, já que ele tem a mesma funcionalidade do principal, podendo substituir/ apoiar o sistema principal quando houver uma necessidade. Um exemplo com esse tipo de sistema foi tratado por Leite (2017) no contexto de Aparelhos de Mudanças de Vias (AMV);
 - Sistema de Proteção – Esse sistema é uma particularidade do sistema de prontidão, sendo assim, seu estado regular é *stand-by* e mantém-se nesse estado até que sua finalidade de proteger seja demandada. Sua função está associada à proteção do sistema principal de algum fator externo, de forma a evitar perdas. Diante disso, conclui-se que todo sistema de proteção é também de prontidão, mas nem todo sistema de prontidão é de proteção. Um exemplo desse tipo de sistema é a válvula de alívio,

que só é utilizada quando o sistema sofre um aumento de pressão. Outro exemplo são os *sprinklers*, chuveiros automáticos de proteção contra incêndio, que só exercem sua função na ocorrência deste.

2.2 Políticas de manutenção

São vários os tipos de manutenção e, associados a eles, existem as políticas de manutenção. A escolha adequada da política de manutenção envolve vários fatores, como: o comportamento da taxa de falha; a frequência de ocorrência da falha; o custo associado a cada falha; a criticidade da falha; e as atividades de manutenção admissíveis. Esses fatores devem considerar aspectos econômicos, segurança e meio ambiente (BLOOM, 2006; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; NGUYEN; BRAMMER; BAGAJEWICZ, 2008).

Complementando esse pensamento, Alsyouf (2007) considera que uma política adequada de manutenção, quando implantada de forma correta, torna-se um diferencial competitivo para a organização.

2.2.1 Tipos de políticas de manutenção

Ding & Kamaruddin (2015) defendem que muitas políticas de manutenção foram desenvolvidas para acompanhar as mudanças no ambiente fabril e o desenvolvimento das tecnologias. Pensando nisso, os autores classificaram as políticas de manutenção de acordo com seu objetivo, dividindo-as em três grandes grupos:

- Políticas cujo objetivo é a restauração do sistema operacional;
- Políticas com foco em preservar o estado operacional do sistema;
- Políticas com propósito estratégico.

O primeiro grupo é limitado à manutenção do tipo corretiva, de modo que só são realizadas intervenções após ocorrer a falha. Sendo assim, os autores apontam que esse tipo de política, quando usada isoladamente, dispensa a necessidade de empenho científico. No entanto, são utilizadas quando existe uma considerável margem de lucros, ou seja, quando é mais lucrativo para a organização consertar a falha a preveni-la.

O segundo grupo tem foco na prevenção da ocorrência de falhas e em conservar o estado operacional do sistema. Nesse sentido, utiliza-se a manutenção preventiva, cujas ações são efetuadas de forma periódica, com intuito de minimizar a probabilidade de falhas (PENG, DONG & ZUO, 2010). Segundo Mechefske & Wang (2001), para a adoção desse tipo de política, é necessária a disponibilidade dos dados históricos para alcançar a otimização. Todavia, uma alternativa paralela poderia ser a prática de ações baseadas no monitoramento

das condições dos componentes ou ainda o uso de modelos para estimar parâmetros – alternativas essas que definem a manutenção preditiva.

A terceira categoria associa a manutenção às funções estratégicas organizacionais. Nesse sentido, a manutenção passa a ser vista e tratada como uma estratégia geradora de lucros dentro da organização (ALSYOUF, 2007).

Diante do que foi dito, a adoção de uma política de manutenção apropriada pode não só reestabelecer e conservar o estado do sistema, mas também apoiar e impulsionar a estratégia organizacional.

2.3 Modelos de manutenção

Para Aven & Jesen (1999), modelos são apenas aproximações da realidade, em que nenhum deles pode incluir todos os aspectos acerca da problemática, (SCARF & CAVALCANTE, 2012) mas ainda assim podem ser úteis na tomada de decisão.

Os modelos de manutenção são uma representação das políticas e descrevem, através de formulações matemáticas, as possíveis decisões a respeito das ações de manutenção, ajudando a atingir um determinado objetivo e especificando qual política de manutenção melhor se adéqua ao objetivo. Tanto os modelos como as políticas de manutenção possuem várias nomenclaturas de classificação.

Uma classificação importante, conforme Vasili *et al.* (2011), categoriza os modelos de acordo com a variabilidade e as incertezas do sistema e divide-os em probabilísticos e determinísticos. Os probabilísticos são modelos voltados ao tratamento de incertezas, e em razão disso, representam a realidade de forma mais fidedigna, como os modelos de tratamento de ações de reparo; enquanto os determinísticos são mais reducionistas e limitados (GHOSH & ROY, 2009; MOURA, *et al.* 2007).

Ding & Kamaruddin (2015) propõem uma classificação para os modelos de manutenção baseando-se em diferentes níveis de certeza neles retratados: certeza, risco e incerteza, em que o nível da certeza apresenta a informação disponível e completa; seguido do nível do risco, que apresenta uma quantidade de informação limitada e, por fim, o nível da incerteza, no qual as informações são insuficientes.

Dentre os níveis descritos por Ding & Kamaruddin (2015), encontram-se algumas das principais abordagens utilizadas na manutenção, como os modelos matemáticos, modelos de simulação, heurística e *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM). No campo da otimização, os modelos mais utilizados são os matemáticos, os quais utilizam linguagem matemática a fim de apresentar uma forma simplificada da realidade (DING & KAMARUDDIN 2015).

Os modelos matemáticos foram inicialmente desenvolvidos com o único objetivo de diminuir o custo da manutenção, sem levar em consideração fatores como a confiabilidade (SHARMA, YADAVA & DESHMUKH, 2011); porém, para Ding & Kamaruddin (2015), essa redução do custo da manutenção refletiria na qualidade da confiabilidade, podendo limitá-la, na prática, a um nível não aceitável. Diante dessas considerações, os autores defendem que, para obtenção de um melhor desempenho, fatores como políticas de manutenção, custo e confiabilidade devem ser considerados nesses modelos.

O modelo de simulação é um método computacional capaz de executar modelos abstratos ao longo do tempo (YOUNG, 2003), e vêm sendo cada vez mais utilizados por proporcionarem uma facilidade no entendimento comportamental do sistema (ALRABGHI & TIWARI, 2015). A simulação de Monte Carlo é um dos métodos de simulação mais utilizados no processo de seleção de políticas de manutenção, tendo o objetivo de diminuir o custo, aumentar a confiabilidade, renovar o sistema, entre outros (DING & KAMARUDDIN, 2015). Os trabalhos de Marseguerra & Zio (2000); Barata *et al.* (2002); Chen & Popova (2002); Moura *et al.* (2007); Mahadevan, Robert & Sridahar (2010) e Aslett, Nagapetyan & Vollmer (2017) são alguns dos quais validam essa afirmação.

A abordagem heurística utiliza lógica, conhecimento e experiência resultantes da observação para resolução de problemas – como é tratado no trabalho de Waeyenbergh & Pintelon (2002). Modelos baseados nessa abordagem podem encontrar uma solução satisfatória de forma mais rápida (TERSINE, 1985).

Por fim, os modelos podem ser baseados em múltiplos critérios – MCDM e são bastante utilizados na determinação de políticas de manutenção. Essa abordagem apresenta uma vantagem, pois ela possibilita a inclusão de múltiplos objetivos no processo de tomada de decisão. Esses múltiplos objetivos podem ser conflitantes, como aumentar a disponibilidade e confiabilidade de um componente e reduzir o custo (VINODH & VARADHARAJAN, 2012). Sendo assim, os modelos baseados em múltiplos objetivos possibilitam a determinação de uma política, que incorpore todos os objetivos que foram previamente definidos.

Almeida, Ferreira & Cavalcante (2015) reúnem modelos multicritério com foco na manutenção e confiabilidade; Sabaei, Erkoyuncu & Roy (2015) reúnem os modelos dessa abordagem que são mais utilizados na manutenção, entre eles estão o *AHP*, *Promethee* e o *Electre*. Os trabalhos de Ferreira, Almeida & Cavalcante (2009) e Cristiano & Almeida (2007) também utilizam a abordagem multicritério aplicada no campo da manutenção.

2.4 Manutenção imperfeita

Com relação aos modelos de manutenção imperfeita, Brown & Proschan (1983) consideram que um componente pode ser reparado com probabilidade p , retornando ao estado de tão bom quanto novo ou com probabilidade complementar $1 - p$, em que o componente é reparado de forma mínima, voltando a funcionar, mas não tão bom quanto novo. Pham & Wang (1996) acrescentam a esse modelo uma visão de que as probabilidades (p e $1 - p$) representam funções da idade do componente.

Já quando se trata de políticas de manutenção imperfeitas, as mais comuns são as políticas de manutenção periódicas, por idade e sequenciais.

- Periódica – As ações preventivas de manutenção são feitas em intervalos de tempo definidos (LIAO, 2012);
- Por idade – As intervenções preventivas de manutenção são executadas quando o componente atinge um tempo previamente determinado, ou ainda no caso do componente falhar antes deste (FLAGE, 2014);
- Sequenciais – Os reparos preventivos são feitos em intervalos decrescentes (NAKAGAWA, 1998). Nesse tipo de sistema, a falha tende a manifestar-se com mais frequência no início do ciclo de vida do componente.

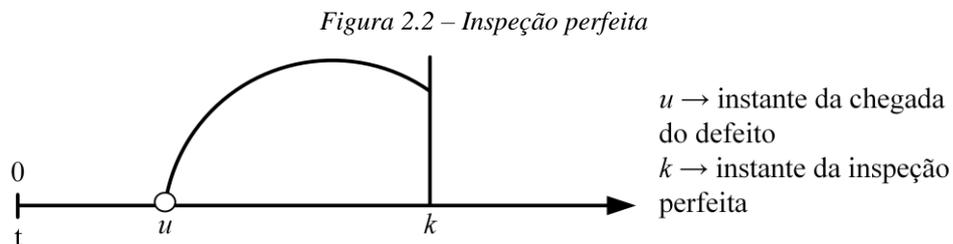
Para todos os casos anteriormente mencionados, de alguma forma o benefício da realização da manutenção difere do benefício esperado, que corresponde a maximização do desempenho do sistema.

2.4.1 Inspeção imperfeita

Antes de dar início a subseção que trata da inspeção imperfeita, é importante elucidar a expressão “inspeção perfeita”, que, de acordo com Wang (2008), pode ser descrita como: ações que ocorrem entre intervalos de tempo pré-determinados e que são capazes de identificar uma irregularidade quando ela realmente está ocorrendo, e imediatamente após a identificação são efetuadas substituições/reparos, de modo que o estado do sistema fique tão bom quanto novo. Nesse caso, o autor não considera a existência de possibilidades como o erro de julgamento ou a introdução de defeito na inspeção, já que considera esta perfeita. No caso da inspeção imperfeita, não há a identificação adequada do estado sistema, podendo oportunizar a eclosão da falha.

O instante em que a inspeção é feita é representado por K e ocorre no tempo t contido no eixo do tempo. Nesse caso, a inspeção é realizada em sistemas onde existe o *delay time* – o tempo entre a chegada do defeito e o surgimento da falha. Sendo assim, função da inspeção é

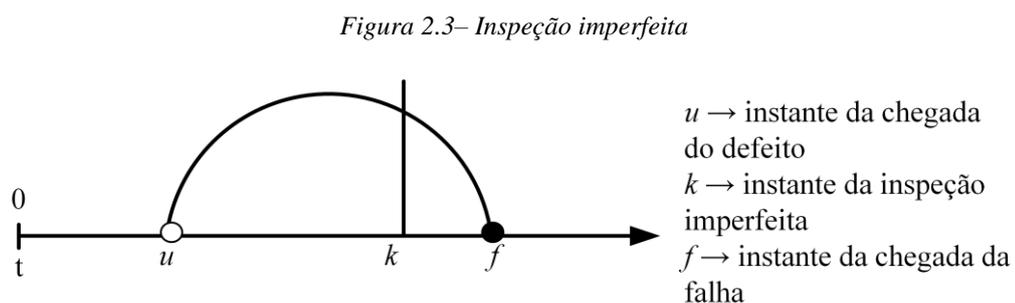
identificar um defeito quando ele realmente existe. Quando isso ocorre, a inspeção é dita como perfeita, e o defeito é identificado e corrigido, como é possível observar, na Figura 2.2, em que após a chegada do defeito (u) foi realizada uma inspeção perfeita onde a detecção e correção do defeito o pronunciamento da falha.



Fonte: adaptado de Wang (2008)

Para Wang (2008), a inspeção perfeita é um dos pressupostos mais restritivos na elaboração de um modelo de manutenção, logo, a maioria dos modelos que considera *delay time* não considera a inspeção perfeita.

A inspeção imperfeita (Figura 2.3) propriamente dita implica a existência de uma irregularidade passar despercebida pela inspeção (WANG, 2008). No contexto de *delay time*, a irregularidade é a existência do defeito, nesse caso a inspeção K não identifica o defeito, por isso é chamada de inspeção imperfeita, e em seguida ocorre o surgimento da falha.



Fonte: adaptado de Wang (2008)

A inspeção imperfeita também pode se apresentar de forma inversa a essa, nesse caso acontece quando não existe o defeito, mas a inspeção o identifica e são tomadas as medidas de reestabelecimento do sistema.

Vários fatores podem implicar em uma inspeção imperfeita, entre eles está o erro de julgamento, que pode se dar através de um erro falso negativo ou falso positivo, assim como a inserção de defeito na inspeção.

2.5 Falha humana

Segundo Reason & Hobbs (2003), as atividades de manutenção, que envolvem remoção e substituição frequente de componentes, são propícias para ocorrência de falhas.

Reason (2000a) conclui, explanando que medidas que têm a finalidade de promover a segurança de um sistema podem também ser o motivador da sua destruição.

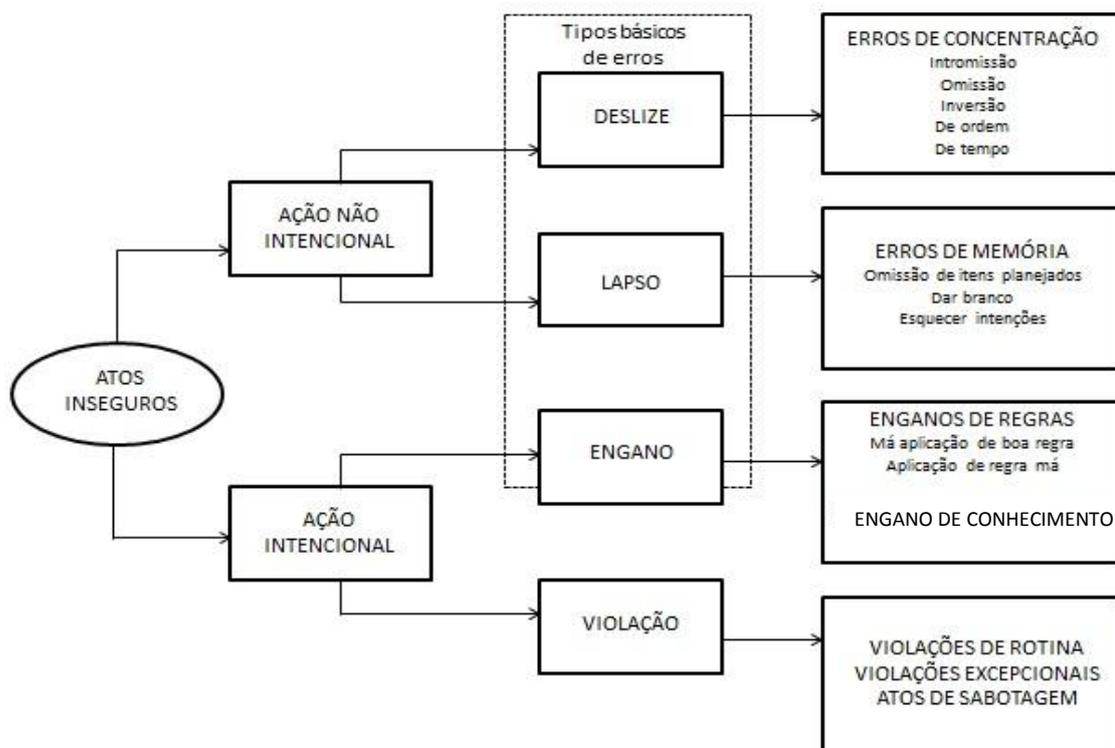
O Homem é um ser imperfeito, sujeito a cometer falhas, e está intensamente envolvido com a área da manutenção. Devido a isso, as possíveis falhas humanas são motivo de constante preocupação nessa área, pois uma falha humana pode ocorrer inesperadamente durante uma ação da manutenção, e esse é, portanto, um dos fatores que geram preocupação no contexto da manutenção. Outro fator gerador de preocupação é a dificuldade em analisar a potencialidade de uma falha humana, e as consequências acerca dela. Diante disso, tem-se a importância de definir e entender as falhas humanas e suas características.

2.5.1 Os tipos de falhas humanas

Segundo Reason (2000), as falhas humanas dividem-se em dois tipos:

- Erros – São atos inseguros não intencionais (Figura 2.4), em que as atividades físicas ou mentais do operador falham e não chegam ao resultado pretendido. Esse erro pode se dar devido à falta de habilidade, percepção da situação, capacidade de julgamento ou tomada de decisões;
- Violações – São atos inseguros que não obedecem aos procedimentos, normas, regulamentos entre outras diretrizes oficiais, gerando situação de risco.

Figura 2.4 – Os tipos de atos inseguros



Fonte: Adaptado de Reason (1997)

Ainda de acordo com Reason (2000), as falhas humanas podem ser definidas como atos inseguros de natureza psico-cognitiva que o ser humano comete e que podem levar a uma situação de perigo. Um ato inseguro é um erro ou violação que, se cometido na presença de uma situação de risco e se não for devidamente controlado, pode evoluir para dano. Não é possível mudar a condição humana, o ser humano é passível de falhas. No entanto, é recomendável mudanças nas condições em que eles trabalham. Nesse sentido, o autor dá enfoque aos aspectos organizacionais.

Com relação a atos inseguros, Reason (2000) classifica as falhas como ativas e latentes. As falhas ativas são representadas pelos próprios erros e violações (atos inseguros), cometidos pelos elementos ativos que estão em contato direto com o sistema de manutenção, ou seja, a equipe técnica de manutenção, que são as pessoas que estão em contato direto com o sistema (REASON, 2000; CORREA & JUNIOR, 2007). Esse tipo de falha tem um impacto direto e de curta duração sobre as defesas, e assim, desencadeia efeito adverso imediato, como o que ocorreu em Chernobyl quando os operadores indevidamente violaram diversos procedimentos e sistemas de segurança, criando, assim, o gatilho imediato para a explosão catastrófica no reator (REASON, 2000).

Ao contrário de falhas ativas, cujas formas específicas são muitas vezes difíceis de prever, condições latentes podem ser identificadas e corrigidas antes de um evento adverso ocorrer, pois elas não geram um efeito imediato e podem permanecer no seu estado de latência por anos, até que entrem em alinhamento com falhas ativas, criando, assim, a oportunidade de acidente. Todavia, as falhas que forem encontradas em estado de latência podem ser identificadas e tratadas através da gestão de riscos proativa ao invés da reativa, e isso diminuiria a oportunidade de acidente (REASON, 2000).

Embrey (1992) divide as falhas latentes em operacionais e organizacionais, e ainda aponta que as falhas de manutenção estão incluídas no grupo das falhas latentes operacionais, em que podem deixar o sistema em um estado de vulnerabilidade ou de indisponibilidade.

As falhas humanas, que podem ser ativas ou latentes, comportam-se de forma diferente em cada tipo de sistema. No sistema principal, uma falha ativa torna-se visível de imediato; já uma falha latente, nesse mesmo tipo de sistema, pode permanecer em latência por anos. Nos sistemas de prontidão ou de proteção, as falhas só são percebidas no ato da inspeção ou quando houver uma necessidade de funcionamento desses sistemas e eles se encontrarem indisponíveis.

Para Dhillon & Liu (2006), o erro humano pode ocorrer devido à existência de fatores como: iluminação inadequada, ferramentas inadequadas no trabalho, formação insuficiente ou inadequada de trabalhadores, altos níveis de ruído, descrição pobre de procedimentos de manutenção, entre outros. Em resumo, eles relacionam a ocorrência de erro humano a fatores como os mencionados acima.

2.5.2 Níveis de classificação dos erros humanos

Os níveis de classificação do erro humano foram desenvolvidos por Rasmussen (1983) e dividem-se em três: Nível da habilidade (*skill-based*); Nível de regras (*rule-based*); e Nível do conhecimento (*knowledge-based*). Essa classificação foi utilizada por Reason (1997) no desenvolvimento do Sistema Genérico de Modelagem de Erros, no qual o autor delimita as origens dos tipos básicos de erros humanos aplicados na execução de uma tarefa, associando-os aos níveis propostos por Rasmussen (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Relação entre os tipos básicos de erros e o modelo SRK

Nível de desempenho	Tipo de erro
Nível de habilidades	Deslizes e lapsos
Nível de regras	Erro de regras
Nível de conhecimento	Erro de conhecimento

Fonte: Adaptado de Reason (1997)

Para o Reason (1997), deslize e lapso geralmente são erros relacionados à falta de atenção ou atenção desviada. Na maioria das vezes, esses erros ocorrem na execução de atividades rotineiras, as quais são feitas de forma quase automática. O erro de regras pode ser descrito como um resultado de uma escolha inapropriada de uma regra, causada por uma visão mal interpretada do estado ou ainda, a aplicação inapropriada da regra. O erro de conhecimento ocorre devido à compreensão incompleta ou imprecisa do sistema, já que envolve uma situação nova, ou ainda devido ao excesso de confiança e tensão cognitiva.

2.5.3 A incidência de erros humanos em sistemas com alta tecnologia

A função da manutenção a transforma em um fator solucionador de problemas – aquela ação que tem função de manter ou restituir um sistema, de modo esse possa desempenhar sua função – porém, não se pode deixar de mencionar que ela é executada pelo homem, que é um ser passível de falhas. Sendo assim, as tarefas executadas por ele, também o são, logo, em uma forma de melhorar a manutenção e reduzir os erros acerca dela, foram

desenvolvidas e inseridas novas tecnologias nas execuções de suas atividades. No entanto, o foco em novas tecnologias traz consigo um adicional de preocupações relacionadas ao erro humano (REASON & MADDOX, 1995).

Embora seja tentador pensar que tais avanços tecnológicos trazem impreterivelmente melhorias para a segurança global, é necessário considerar que indústrias que possuem um alto grau de complexidade tecnológica e organizacional, além de inovações tecnológicas, apresentam também um elevado potencial de acidentes, pois exigem novas habilidades e conhecimentos por parte do homem, e isso pode proporcionar uma oportunidade para o surgimento de novos erros (PERROW, 1984; LATORELLA & PRABHU, 2000). Sales *et al.* (2007) consideram que a falta de treinamento é um dos fatores contribuintes para o desencadeamento de erros. Já Khan & Abbasi (1999) consideram a negligência da equipe de manutenção como uma causa principal.

A falta de treinamento pode estar relacionada a diversos fatores, um deles é a curva de aprendizagem, na qual o tempo e prática de execução de uma atividade são essenciais para que seja feita de forma mais rápida, precisa e com mais qualidade. Enquanto, algumas tarefas podem demandar de um menor tempo de aprendizagem, outras podem ser mais complexas e demandar um tempo maior (PEINADO & GRAEML, 2007).

As inserções de novas tecnologias nas atividades de manutenção demandam mais tempo e prática, para que sejam executadas de forma mais precisa, rápida, com mais qualidade e, conseqüentemente, com uma menor possibilidade de erros.

Indústrias que apresentam um alto grau de complexidade podem apresentar também um alto grau de pressão em relação a seus funcionários. Essa pressão, por sua vez, pode vir a contribuir para um erro humano. Ações de manutenção como inspeção e substituição são executadas em um limitado intervalo de tempo. Este pode ser entendido como outro fator contribuinte para uma execução incorreta das ações da manutenção. Para Embrey (1992), acidentes geralmente surgem a partir de uma combinação de erros humanos ativos e latentes em áreas como design, operações e manutenção. Isso foi verificado através de acidentes como: Challenger; Exxon Valdez; Piper Alpha; e Three Mile Island.

A preocupação com erros humanos na manutenção faz com que sejam introduzidas novas tecnologias nessa tarefa. Ainda assim, a manutenção provavelmente continuará sendo a área na qual o homem sempre estará em contato direto com o processo, ainda que sejam inseridas novas tecnologias no mesmo (REASON, 1997), pois é dotado de características como senso, antecipação e percepção, o que lhes permite um papel decisivo na tomada de

decisões, algo que ainda não é possível para o sistema técnico (BORGES & MENEGON, 2009). Carvalho & Menegon (2013) completam afirmando que na atividade de manutenção, independentemente do processo ou tecnologia, uma redução considerável do contato direto entre operador e máquina é algo impossível.

Para Reason (1997), as tecnologias modernas utilizadas em centrais nucleares, indústrias químicas e na aviação comercial são mais vulneráveis às consequências de uma cultura de segurança deficiente do que as indústrias tradicionais. De acordo com Nivolianito, Konstandinidou & Michalis (2006), as indústrias químicas possuem o domínio quando se trata de número de acidentes. Essa afirmativa é fortalecida por Okoh & Haugen (2013), Hurst *et al.* (1991) e Changa & Lin (2006), que revisaram acidentes em indústrias químicas e concluíram que 44, 38,7 e 30% deles, respectivamente, estavam associados a manutenção.

Com relação às consequências de acidentes individuais e organizacionais, Reason (1997) considera que os individuais ocorrem em números maiores do que os organizacionais, e são ocasionados por um único agente, que geralmente é a vítima do mesmo, mas não necessariamente a única vítima, pois as consequências para as pessoas envolvidas podem ser grandes. No entanto, sua disseminação, para grupos não envolvidos, é pequena; em contra partida, os acidentes organizacionais têm múltiplas causas, podendo envolver pessoas de vários setores em uma indústria, e até atingir grupos não envolvidos diretamente.

Os erros nas atividades acerca da manutenção podem estar tanto relacionados ao cenário de um único agente como ao organizacional – mais de um agente. Os erros no cenário organizacional geralmente envolvem várias esferas desta.

Diante do que foi exposto a respeito da manutenção, deve-se considerar que essa atividade quando executada de forma inadequada, pode proporcionar oportunidades para a ocorrência de falhas. E essas falhas, por sua vez, podem causar desde simples paradas no sistema até grandes catástrofes, podendo ter consequências como: altos prejuízos; perda de vida humana e impacto ambiental.

Conforme o tipo de sistema que esteja sendo tratado e da significância do erro humano, pode ser interessante admiti-lo ou não, na composição de um modelo de manutenção. Okoh & Haugen (2013) e Okoh (2015) acrescentam que os modelos de otimização na manutenção ganharam visibilidade em decorrência da necessidade de se estabelecer uma manutenção ideal, que diminuísse os riscos que se encontravam acerca de vários acidentes em indústrias. Esses riscos se faziam mais presentes principalmente nas indústrias que processavam ou armazenavam substâncias perigosas.

3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ERRO HUMANO EM MODELOS DE MANUTENÇÃO

Algumas das constatações apresentadas no capítulo anterior foram os principais motivadores para uma análise mais profunda de trabalhos que enfocam em possíveis erros que podem ocorrer durante a execução da atividade de manutenção. Consequentemente, este capítulo traz o detalhamento de alguns modelos que incorporam diferentes situações de erros, na execução da atividade de manutenção. Para tal, foram utilizados relevantes trabalhos que consideram o erro humano em sua composição, a partir dos quais foram feitas comparações entre cenários que consideram erros humanos e cenários que não consideram, para assim facilitar a compreensão de como o fator humano implica a escolha pela política de manutenção.

Faz-se necessário uma breve introdução acerca dos modelos de manutenção no contexto do erro humano.

Todos os modelos de manutenção são simplificações da realidade e são constituídos de pressupostos, os quais simplificam a matemática envolvida. Porém, também restringem o uso mais amplo dos modelos, fazendo com que alguns não sejam válidos para situações práticas (WANG, 2009). Por exemplo, alguns modelos admitem o erro humano e outros não. Os que não consideram erros humanos em todo processo de manutenção admitem que atividades como inspeção e substituição sejam executadas de forma perfeita, sem risco de inserção de defeito, ainda que feitas por um indivíduo passível de incorrer em falhas. Porém, existem alguns fatores que podem contribuir para a desconsideração do fator humano, como: falta de dados históricos; rara ocorrência de erro humano no sistema; efeito pouco significativo do erro, entre outros. Todavia, quando a ocorrência do erro humano apresenta significância, é interessante considerá-lo na composição do modelo.

Na sequência, serão apresentados alguns cenários que apresentam erros humanos, quais sejam: erro de julgamento na inspeção; inserção de defeitos na inspeção e na substituição de componentes.

3.1 Erro de julgamento na inspeção para sistema em dois estados

Para Berrade, Cavalcante & Scarf (2012), uma política de inspeção pode estar sujeita a erros de julgamento falso positivo e falso negativo. Em uma inspeção de um sistema de proteção, o erro de julgamento falso positivo pode indicar que o sistema está falho e que precisa ser substituído (ação máxima), quando na verdade o sistema está operacional, e nesse

caso, o sistema poderia vir a ser substituído desnecessariamente. A probabilidade de ocorrer falso positivo é representada por α na Tabela 3.1.

O falso negativo indica que o sistema é bom, quando na verdade ele é falho. Em uma emergência, esse último erro pode resultar na indisponibilidade do sistema de proteção, ocasionando interrupção do processo operacional. A probabilidade de ocorrer um falso negativo é representada por β e também conta na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Classificação do estado do sistema e inspeção, com probabilidades associadas.

Resultado da inspeção	Estado do sistema	
	Sistema bom	Sistema falho
Inspeção indicando sistema bom	Verdadeiro positivo $1 - \alpha$	Falso negativo β
Inspeção indicando sistema falho	Falso positivo α	Verdadeiro negativo $1 - \beta$

Fonte: adaptado de Berrade, Cavalcante & Scarf (2012)

Ainda em conformidade com os autores, fica claro identificar que os erros de julgamento podem resultar em um custo adicional para a organização, e esse é um dos motivos pelos quais é importante o estudo de modelos de inspeção que admitem erro de julgamento.

O trabalho de Berrade, Cavalcante & Scarf (2012) foi definido para problemas de erros de julgamento na inspeção e instalação em sistemas de proteção. Este sistema é definido pelos autores como um sistema que só é ativado sob demanda, por exemplo, em caso de emergência, (JIA & CHRISTER, 2002) com o intuito de proteger o sistema ou ainda dar continuidade operacional ao processo.

Os autores tratam de sistemas de proteção em máquinas de bebidas – cuja finalidade é evitar o desalinhamento da máquina – tendo como pressupostos:

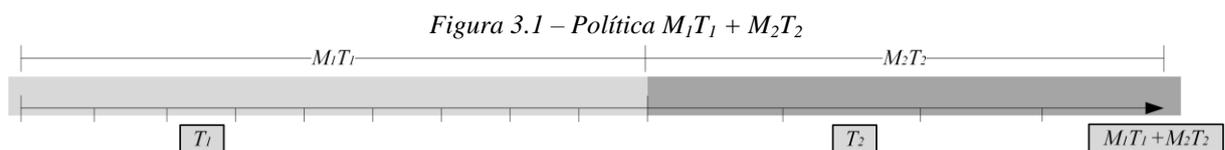
- Sistema em dois estados: operacional ou falho;
- Sistema de proteção, no qual a falha não se pronuncia;
- População de itens heterogênea;
- Política de manutenção em duas fases $M_1T_1 + M_2T_2$.

O estado funcional desse tipo de sistema é definido como operacional ou falho, no entanto, a identificação desse estado só é possível através da inspeção (BERRADE, CAVALCANTE & SCARF, 2012), pois se trata de um sistema de proteção, o qual só deixa o estado inativo sob demanda (desalinhamento da máquina). Segundo os autores, a taxa de

ocorrência de demanda (μ) chega ao sistema de forma aleatória, com $\mu = 1$ a cada quatro anos e a um custo de 72 horas – medido em tempo de produção.

A Figura 3.1 representa um esquema de política de manutenção. Uma característica própria dos sistemas de proteção é que a falha não se pronuncia, por isso é necessária à realização de inspeções para se conhecer o estado do sistema. Porém, se a inspeção for executada de forma imperfeita, um dos riscos é ocorrer um erro de julgamento, em que uma de suas possibilidades é ocorrer a demanda e o sistema se apresentar falho.

A política $M_1T_1 + M_2T_2$ (Figura 3.1) é uma política mista de inspeção e substituição, em que M corresponde ao número de inspeções e T ao tempo entre as inspeções. Essa política é dividida em duas fases: na primeira fase (M_1T_1), o intervalo entre as inspeções realizadas é menor que na segunda fase (M_2T_2), pois o objetivo da fase M_1T_1 é identificar o número máximo possível de componentes fracos. Na fase M_2T_2 , os intervalos entre as inspeções são maiores, pois se acredita que muitos dos componentes fracos foram identificados na primeira fase, e, assim, não seguiram para a segunda fase.



Fonte: Esta pesquisa

Os autores tratam de dois tipos de erros humanos que podem ocorrer na inspeção desse tipo de sistema: um é o erro de julgamento na inspeção e o outro é o erro de instalação.

O erro de julgamento, tanto na inspeção como na instalação, pode, além de custos, trazer consequências irreparáveis para o sistema e para a própria indústria. Nesse sentido, um acidente pode ser traduzido como uma das piores consequências que o erro de julgamento pode acarretar. Nessa perspectiva, as implicações de um acidente ultrapassam os custos com o sistema e ganham maiores proporções.

Suchman (1961) considera o erro de julgamento na manutenção como um dos fatores contribuintes para um acidente, que, por sua vez, é uma das piores consequências de um erro. O erro de julgamento pode estar relacionado a fatores como: falta de treinamento; pressão advinda do trabalho; questões organizacionais e falta de comunicação entre equipes de manutenção – esse último caso está associado a indústrias que demandam mais de uma equipe de manutenção.

Até aproximadamente 1950, um fator como erro de julgamento era visto como uma causa de acidente atribuída apenas ao homem (NEBOT, 2003). Com o passar dos anos,

estudos – Helmreich (1999); Shappell & Wiegmann (2000) e Fajer, Almeida & Fischer (2011) – passaram a investigar a explicação por trás de fatores como erro de julgamento que atribuíam culpa ao homem. A partir de então, o erro de julgamento passou a ser associado a uma série de fatores, tais como, falta de treinamento, falta de comunicação, pressão no ambiente de trabalho, procedimento dúbio, entre outros.

Voltando ao trabalho Berrade, Cavalcante & Scarf (2012), a primeira inspeção no sistema de proteção é feita pela equipe da empresa a um custo $C_0 = 5$ unidades (un). Quando é identificada uma falha, podem ocorrer duas situações: na primeira, a equipe do fabricante é chamada a um custo de $C_i = 50$ un, e, como se trata de uma equipe especializada, efetua-se uma nova inspeção antes de qualquer outro procedimento, para, assim, identificar se realmente ocorreu falha no sistema. Se esta for identificada, é efetuada a substituição do item a um custo de $C_r = 150$ un. Caso seja encontrado um erro falso positivo, não será efetuada a substituição do item, porém, o deslocamento da equipe do fabricante já incorre em $C_i = 50$ un. Se o item chegar até o tempo de efetuar a manutenção preventiva, sem que tenha tido necessidade de acionar a equipe do fabricante, o custo é de $C_p = 100$ un, uma vez que quando o item é substituído preventivamente, ele volta ao estoque como peça sobressalente.

Na segunda situação, a equipe da empresa, que é a mesma que identificou a falha na primeira inspeção (C_0), efetua a substituição do item sem qualquer outro tipo de avaliação. O custo associado à substituição devido à falha – manutenção corretiva – é de $C_r = 105$ un, já que não existe o C_i associado ao deslocamento da equipe do fabricante. Se o item atingir a idade de substituição preventiva, o custo será de $C_p = 55$ un. É importante mencionar que a qualidade da manutenção feita pela equipe do fabricante é maior que a da equipe da empresa.

Por um lado, a equipe do fabricante pode evitar que a empresa tenha um custo com a substituição desnecessária do item, ainda que exista o custo do acionamento da equipe ($C_i = 50$ un); por outro lado, existe a possibilidade de substituição indevida ($C_r = 105$ un) pela equipe da empresa, porém, não se tem o custo do acionamento da equipe do fabricante.

A Tabela 3.2 apresenta os resultados associados aos custos de quando a manutenção é feita pelo fabricante original do equipamento (primeira situação). Nela, foram analisadas as implicações que alterações nos parâmetros de julgamento, falso positivo e falso negativo, causam nas variáveis de decisão.

Tabela 3.2- Resultado da manutenção pela fabricante original do equipamento

Parâmetro de alarme falso		Valores ótimos das variáveis de decisão				Custo	disponibilidade média	
β	α	M_1	M_2	T_1	T_2	Custo	A	
0,2	0,2	3	2	360	1356	0,0744	0,981	1
0,2	0	5	6	193	533	0,0591	0,988	2
0,2	0,4	2	2	555	1377	0,0839	0,975	3
0,2	0,6	2	2	571	1406	0,0914	0,975	4
0	0	3	7	272	508	0,0546	0,989	5
0	0,2	2	2	456	1424	0,0669	0,983	6
0,4	0,2	4	2	304	1302	0,0838	0,976	7
0,6	0,2	6	2	227	1259	0,978	0,971	8

$\beta_1 = 2,5$; $\beta_2 = 4,5$; $\eta_1 = 500$; $\eta_2 = 7000$; $p = 0,1$; $C_0 = 5$; $C_p = 100$; $C_r = 150$; $\mu = 0,00005$; $C_d = 27,000$; $C_i = 50$; $t_r = 6$; $t_m = 6$

Fonte: Adaptado de Berrade, Cavalcante & Scarf (2012)

Em que, C_d – custo da demanda não atendida; C_p – custo da substituição preventiva; t_r – tempo de duração da substituição de um componente falho; t_m – tempo de duração da substituição de um componente não falho; β_1 e β_2 são parâmetros de forma e η_1 e η_2 são parâmetros de escala. Esses são utilizados com mesmo significado também na Tabela 3.3.

Através dos resultados, é possível perceber que quando β e α são iguais a zero, é encontrado o custo ótimo, nesse caso, os erros de julgamento são ignorados. É possível apontar que α (falso positivo) tem uma maior representatividade nos custos do que β (falso negativo), e isso fica claro ao comparar os custos das linhas 2 ($\beta = 0,2$ e $\alpha = 0$) e 6 ($\beta = 0$ e $\alpha = 0,2$). O custo para o $\alpha = 0,2$ distancia-se mais do valor ótimo do que quando o $\beta = 0,2$. Sendo assim, pode-se inferir que um erro falso positivo (α) é mais caro que um erro falso negativo (β). Logo, a política que traz o segundo melhor custo é a apresentada na linha 2, na qual $\beta = 0,2$ e $\alpha = 0$.

É importante analisar as influências que os valores dos parâmetros β e α causam não só nos custos e na disponibilidade, mas também nas variáveis de decisão M e T . A partir da variação de valores indicados em β e α , é possível concluir que quando α tende a zero provoca um aumento significativo na quantidade de M_2 . Isso fica claro ao comparar as linhas 2 e 6 com a linha 5. Ao aumentar o percentual em β nas linhas 7 e 8, verifica-se um aumento na quantidade de M_1 .

A Tabela 3.3 ilustra resultados associados aos custos, referentes à manutenção realizada pela própria equipe da empresa.

Tabela 3.3 - Resultado da manutenção feita pela própria equipe da empresa

Parâmetros de alarme falso		Valores ótimos das variáveis de decisão				Custo	Disponibilidade média
β	α	M_1	M_2	T_1	T_2	Custo	A
0,2	0,2	2	3	497	975	0,0683	0,975
0,2	0	4	5	229	580	0,0468	0,988
0,2	0,4	2	2	616	1386	0,0894	0,965
0	0	3	5	278	612	0,0425	0,989
0	0,2	2	2	457	1395	0,0569	0,982
0,4	0,2	3	3	408	901	0,0842	0,967

$\beta_1 = 2,5$; $\beta_2 = 4,5$; $\eta_1 = 500$; $\eta_2 = 7000$; $p = 0,1$; $C_0 = 5$; $C_p = 55$; $C_r = 105$; $\mu = 0,00005$; $C_d = 27,000$; $C_i = 50$; $t_r = 6$; $t_m = 6$

Fonte: Adaptado de Berrade, Cavalcante & Scarf (2012)

Ao comparar o valor ótimo das duas situações ($\beta = 0$ e $\alpha = 0$), verifica-se que, quando a manutenção é feita pela equipe da empresa, ela apresenta o melhor custo 0,0425 contra 0,0546, quando é efetuada pela equipe do fabricante original. Com relação à disponibilidade, os valores de ambos são equivalentes. Porém, os resultados nas Tabelas 3.2 e 3.3 consideram apenas os parâmetros de erro de julgamento na inspeção. Entretanto, deve-se considerar também a heterogeneidade da população de componentes ao fazer a substituição. Sendo assim, é possível inferir que a opção da manutenção realizada pela própria equipe da empresa, apresenta uma maior vulnerabilidade, já que apresenta uma maior possibilidade de fazer mais substituições, pois é mais provável que um falso positivo, seguido de substituição ocorra nessa situação, e, sabendo-se que as substituições são advindas de uma população heterogênea, confirma que a manutenção feita pela equipe da empresa apresenta uma maior vulnerabilidade.

Comparando-se os valores de β e α de ambas as situações apresentadas, pode-se inferir que é provável que exista uma tendência na qual a manutenção feita pelo fabricante passa a apresentar melhores custos para quando β e α apresentam valores maiores que 0.2.

Em muitas situações que envolvem erros de julgamento falso positivo e negativo, o senso comum geralmente indica que o falso negativo apresenta um maior impacto nos custos, e isso é justificado pelos custos atribuídos sobre uma demanda não atendida. Porém, em

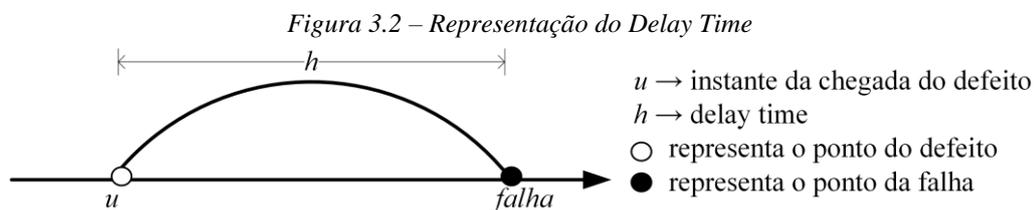
ambas as situações apresentadas, o falso positivo apresenta uma maior representatividade nos custos. Na primeira situação, esse parâmetro resulta em um custo extra para a empresa contratante e na segunda situação resulta em um custo pela substituição do componente.

3.2 Política *KAT*

Ocorrências de falsos positivos e falsos negativos afetam a dinâmica de planejamento de manutenção, como foi mostrado na seção anterior. Além disso, erros cometidos durante a instalação devem ser vistos com bastante cuidado, uma vez que tais erros, na prática, podem ser frequentes, e modificar o comportamento da falha, que termina por ocorrer de forma prematura.

Nesta seção, faz-se uma análise dos erros de instalação, tomado por base a abordagem adotada em Scarf & Cavalcante (2012) que propõem uma política, aqui chamada de *KAT*, que é capaz de lidar com diferentes comportamentos de falhas, referentes a distintas populações de componentes.

Antes de começar a discorrer sobre a política *KAT*, é importante retornar ao conceito *delay time*, já que este está contido nessa política. Sendo assim, *delay time* (Figura 3.2) pode ser descrito como tempo percorrido entre a chegada de defeito e a eclosão da falha (CHRISTER, 1999) e proporciona aos modelos que o consideram uma janela de oportunidades para atuar antecipadamente ao surgimento da falha. Sendo assim, conclui-se que o *delay time* é importante no processo decisório que envolve a gestão da manutenção (FERREIRA, ALMEIDA & CAVALCANTE, 2009), pois a partir dele é possível interferir no processo, detectando o defeito através de inspeções e substituindo o componente, a fim de evitar que a falha se manifeste.



Fonte: Adaptada de Wang (2012, p.167)

Para Wang (2012) o processo de falha de um dispositivo pode ser dividido em dois estágios: o primeiro representa a chegada do defeito; o segundo, o período de tempo entre a chegada do defeito e o surgimento da falha chamado de *delay time* (h). Nesse sentido, as inspeções (K) apresentadas na Figura 3.3 têm por função identificar o estado do sistema –

operacional ou defeituoso. Ao detectar o estado defeituoso, deve-se fazer a substituição do componente, para assim evitar que a falha ocorra antes da substituição preventiva. No entanto, Berrade, Scarf & Cavalcante (2017) analisaram situações em que, por algum motivo, a substituição do componente não pode ser realizada logo após a descoberta do defeito. Entre esses motivos estão: substituição ineficaz e precoce, devido a um erro de falso positivo, e má instalação como resultado de uma preparação insuficiente por parte dos mantenedores.

O *delay time* só pode ser considerado em sistemas que apresentam três ou mais estados (operacional, defeituoso ou falho), e isso ocorre independentemente do tipo de sistema (principal, de prontidão ou de proteção). O que diferencia esses três sistemas está associado à chegada da falha, a qual é explícita no sistema principal e nos outros sistemas só será percebida quando houver uma necessidade de uso do sistema ou através da inspeção.

No caso do *delay time* igual a zero, a inspeção torna-se inútil, pois a falha no sistema transforma-se em uma falha operacional de forma imediata. Nesse sentido, o estado do sistema fica reduzido a operacional e falho (SCARF, *et al.*, 2009).

Independentemente do tipo de sistema, ou dos estados nele considerados, a ação da inspeção detém uma considerável importância. Todavia, deve-se analisar a possibilidade de inserção de defeitos a partir dela, sendo este um dos aspectos a ser considerado na escolha da política de manutenção.

De acordo com Wang *et al.* (2011), o *delay time* é útil para estabelecer ações de inspeção e manutenção a um baixo custo, mas também pode ser utilizado com outras finalidades. Lu *et al.* (2012) utilizaram-no para otimizar o intervalo entre as inspeções em sistemas de *stand by*.

Nos modelos que consideram *delay time*, as inspeções que têm por função identificar defeitos podem ser imperfeitas, pois nelas existe a possibilidade de ocorrer erros humanos, que, por sua vez, podem acarretar sérias consequências (ZHAO *et al.*, 2007).

Considerando-se que o conceito *delay time* já foi descrito com clareza, pode-se iniciar a descrição da política *KAT*.

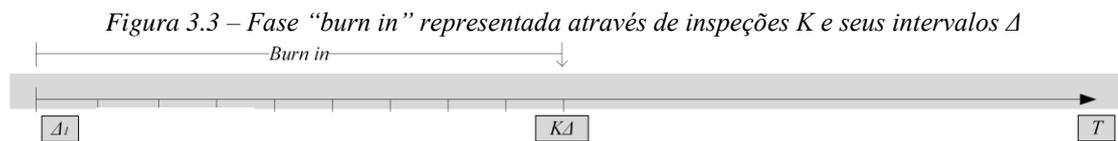
KAT é uma política híbrida de inspeção e substituição preventiva baseada na idade. Ela foi proposta por Scarf *et al.* (2009) para sistemas compostos por três estados: bom; defeituoso e falho. O estado defeituoso equivale ao *delay time*, que já foi explicado anteriormente.

Ainda em conformidade com os autores, o objetivo dessa política é reduzir a presença de falhas precoces, para isso são efetuadas K inspeções, em intervalos de tempo Δ , até que se atinja a idade $K\Delta$. A substituição do componente poderá acontecer em dois momentos: o

primeiro ocorre quando for identificado o estado defeituoso no ato da inspeção; o segundo, quando o componente atingir a idade T (SCARF *et al.* 2009).

Essa política pode transformar-se em outras políticas, a depender dos valores que são atribuídos a suas variáveis. Se $K = 0$, a política fica reduzida a uma política de substituição pura, já que não existem inspeções, e conseqüentemente também não existem intervalos entre elas; por outro lado se $K = \infty$, não se faz substituição preventivamente, substitui apenas quando houver a falha. Para que a política $K\Delta T$ seja utilizada de forma efetiva, $K\Delta$ deve ser menor que T .

Quando essa política é aplicada a populações heterogêneas, o propósito das inspeções é identificar componentes fracos e evitar falhas precoces do sistema, de modo a simular o processo *burn in* (Figura 3.3).



Fonte: esta pesquisa

É importante destacar que o erro da instalação é modelado por uma função densidade que corresponde a uma mistura de distribuição em que o peso de cada distribuição, corresponde ao percentual de vezes em que o erro da instalação ocorre.

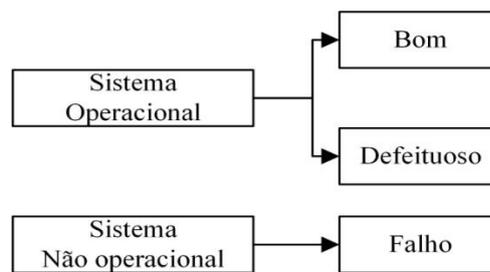
3.2.1 Introdução de defeitos na inspeção para sistemas em três estados

A inspeção é uma atividade cuja função está associada à verificação do estado de um componente/sistema. No entanto, durante a ação dessa atividade, podem-se inserir defeitos, e partindo dessa conjectura, foram desenvolvidos alguns modelos que consideram a possibilidade de inserção de defeito durante a inspeção. Sendo assim, é importante o desenvolvimento de modelos que considerem essa especificação, pois elas estão associadas a conseqüências como: a diminuição da vida útil do componente; uma possível falha; o aumento nos custos com substituições não planejadas; entre outros.

Scarf & Cavalcante (2012) desenvolveram um modelo que considera a possibilidade de instalação imperfeita e a indução de defeitos durante a inspeção. O modelo é definido para sistemas principais no contexto de válvula de controle de pressão, em que a finalidade da válvula é manter a pressão constante, pois, caso haja uma falha, esta pode resultar na oscilação (perda ou aumento) da pressão, que por sua vez, causa perigo para o consumidor.

Para o problema em questão, a inspeção identifica se o sistema está no estado bom ou defeituoso (Figura 3.4), já que o estado falho se pronuncia independentemente da inspeção. Nesse sentido, a inspeção é importante, pois visa atuar no estado operacional do sistema, antecipando-se à falha.

Figura 3.4 – Estado de funcionalidade do sistema



Fonte: Esta pesquisa

Para o problema, foram considerados os seguintes pressupostos:

- População de componentes heterogêneos: fracos e fortes;
- Sistema em três estados: bom, defeituoso ou falho;
- Sistema com único componente;
- Proporção (p) de heterogeneidade dos componentes é variável;
- Custo varia a depender da proporção de heterogeneidade dos componentes;
- Política mista de inspeção e substituição por idade.

Scarf & Cavalcante (2012) esclarecem que a confiabilidade dos componentes está relacionada ao fator de heterogeneidade (p), que é a proporção de componentes fracos no sistema, em que quanto menor for p , mais confiável será a população de componentes. Dito de outra forma, a qualidade dos componentes é resultado da mistura de componentes fortes e fracos na população. A qualidade está relacionada à opção por determinado fornecedor, já que se sabe que p difere de um fornecedor para o outro.

A qualidade dos componentes dos fornecedores A e B estão associadas a um custo e a proporção de componentes fracos (p). O fornecedor B, dispõe de uma menor proporção (p) de componentes fracos, que o fornecedor A, porém, a um custo de $C_A + C_B$ (Tabela 3.4), esses fatores podem ter influência na definição de uma política ótima de manutenção.

Tabela 3.4 – Custo e proporção dos componentes fracos de cada fornecedor

	Fornecedor A	Fornecedor B
Custo da substituição (C)	C_A	$C_A + C_B$
Proporção de componentes fracos (p)	p_A	$p_B (p_A > p_B)$

Fonte: adaptado de Scarf & Cavalcante (2012)

A confiabilidade e o custo dos componentes sofrem alterações ao mudar de um fornecedor para outro, como é possível observar na Tabela 3.4. O operador pode optar entre os fornecedores e deve considerar o custo-benefício na escolha por cada um, uma vez que pode ser mais vantajoso em uma visão em longo prazo escolher o fornecedor que ofereça componentes com uma maior confiabilidade.

A qualidade do fornecedor pode se manifestar através da heterogeneidade dos componentes que serão substituídos, por meio da qualidade da inspeção ou ainda pela qualidade da instalação. Neste caso, o fator p de heterogeneidade dos componentes e a probabilidade de má instalação durante a substituição preventiva são consideradas equivalentes, ou seja, quanto menor a qualidade do fornecedor (maior a proporção de componentes fracos), maior a possibilidade de uma má instalação ocorrer. Scarf & Cavalcante (2012) consideraram dois aspectos: a qualidade dos componentes acerca dos dois fornecedores e a introdução de defeitos na inspeção, a fim de se reduzir os custos.

A política mista de inspeção e substituição por idade considera os três estados do sistema. Nesse sentido, a política incorpora o conceito de *delay time*, que foi tratado na seção.

No primeiro modelo, é considerado que as inspeções são perfeitas, e, assim, não há introdução de defeitos a partir delas, não há sequer qualquer erro de julgamento. A essência desse modelo gira sobre a qualidade dos fornecedores: o fornecedor com maior qualidade possui uma menor proporção de componentes fracos, porém, a um maior custo. Essa qualidade é representada pelo parâmetro de mistura p . O tempo de chegada de defeito ocorre de acordo com a distribuição *Weibull*, e é significativa, sendo de 1 ano para componentes fracos e de 6 anos para fortes.

No segundo modelo, considera-se a possibilidade de introdução de defeitos através da inspeção – inspeção imperfeita. Nesse sentido, o foco do modelo está na qualidade do mantenedor. Os autores desenvolvem um modelo no qual a ação da manutenção é dividida em duas fases: a primeira é a fase de inspeção precoce, que nesse caso não precisa ser realizada durante toda vida útil do componente; a segunda fase é a do desgaste, em que o componente está sujeito à substituição programada ao atingir uma idade pré-determinada, e essa substituição é feita a partir de uma população heterogênea de componentes.

O presente trabalho não tem o objetivo de explorar a construção de modelos, e sim de discutir os resultados obtidos através deles. Para compreensão dos resultados, faz-se necessário o conhecimento de todas as variáveis.

Em sequência, é apresentada a Tabela 3.5 com os resultados obtidos por Scarf & Cavalcante (2012). Nela, os autores consideraram a qualidade dos fornecedores, sendo possível observar os efeitos que a variação dos diferentes parâmetros (p_B e C_B) dos fornecedores causam nas variáveis de decisão e nos critérios de decisão. A partir dessa Tabela é possível identificar que, à medida que o custo da falha (C_f) aumenta o fornecedor B tende a tornar-se mais preferível. Isso é reflexo da menor proporção de componentes fracos (p) contidos nele, fazendo com que a probabilidade de ocorrer uma falha no fornecedor A seja superior ao B.

Na Tabela 3.5, são apresentadas políticas ótimas em função do custo, e são avaliadas a qualidade dos fornecedores (A e B). Essa Tabela possui diferentes parâmetros de entrada, porém o a possibilidade de introduzir defeito na inspeção, que é representado por q , é igual a zero, já que a Tabela tem o objetivo de avaliar a qualidade dos fornecedores. Já na Tabela 3.6, a possibilidade de introduzir defeito (q) é considerada, porém, com valores bem pequenos, devido os valores serem pequenos, se pode observar a significância de p e q custo. Ambas as tabelas possuem os valores de C_A , λ , β_1 , β_2 , η_1 e η_2 iguais, considerando o tempo em longo prazo.

Tabela 3.5 – Política ótima para vários valores de parâmetros comparáveis e modelo de falha com componentes produzidos pelo fornecedor A e pelo fornecedor B. $p_A=0,1$, $C_A=1$, $\lambda=0,167$, $\beta_1=2,5$, $\beta_2=5$, $\eta_1=1,0$ e $\eta_2=6,0$.

Caso	Parâmetros de Custo				Valores ótimos de variáveis de decisão			Valores dos critérios de decisão	
	C_i	C_f	p_B	C_B	T	Δ	K	C	$MTBOF$
Fornecedor A									
1	0,05	9,0			3,44	0,28	5	0,671	32,2
2	0,05	5,0			3,73	0,99	1	0,525	22,9
3	0,05	13,0			3,27	0,22	7	0,783	37,8
4	0,01	9,0			3,32	0,17	9	0,578	40,3
5	0,09	9,0			3,48	0,99	1	0,704	24,7
Fornecedor B									
1	0,05	9,0	0,01	0,10	3,16		0	0,470	76,5
2	0,05	5,0	0,01	0,10	3,52		0	0,409	54,7
3	0,05	13,0	0,01	0,10	2,96		0	0,518	91,4
4	0,01	9,0	0,01	0,10	3,16	1,01	1	0,469	79,9
5	0,09	9,0	0,01	0,10	3,16		0	0,470	76,5
6	0,05	9,0	0,05	0,50	3,49	0,99	1	0,710	36,6

Fonte: adaptado de Scarf & Cavalcante (2012)

Em que, C_i é custo da inspeção, C_A é o custo do fornecedor A, $1/\lambda$ é o tempo médio de permanência do defeito, β_1 e β_2 são parâmetros de forma, η_1 e η_2 são parâmetros de escala, $MTBOF$ é tempo médio entre falhas, p_A e p_B representam as proporções de componentes fracos dos fornecedores A e B.

Para uma melhor compreensão, a Tabela 3.6 está dividida em 12 linhas. Através dela, é possível analisar os impactos provocados nos custos, pelas variações do parâmetro p e q . Neste caso, percebe-se que qualquer acréscimo nesses parâmetros, por menor que seja, provoca um aumento no custo e uma mudança na política. Isso mostra a influência da introdução de um erro humano, seja ele, através da inserção de um defeito na inspeção ou na instalação.

Os resultados que serão mostrados na sequência, apresentam equivalência quanto aos custos dos parâmetros C_i e C_f . Porém, a razão da escolha pelos respectivos resultados também leva em consideração a adoção do parâmetro $p = 0,10$ em ambas as Tabelas 3.5 e 3.6. Assim sendo, a primeira comparação pode ser identificada na linha 1 da Tabela 3.5, em que são recomendadas fazer 5 inspeções a um custo ótimo de 0,671 un, com as linhas 7,8 e 9 da Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Políticas de custo mínimo em função do número de inspeções K para vários p e q . $C_i = 0,05$ e $C_f = 9,0$

Caso	p	Q	Valores das variáveis de decisão			Valores dos critérios de decisão	
			T	Δ	K	C	$MTBOF$
1	0,25	0,03	3,975		0	1,227	9,85
2	0,25	0,03	3,974	0,997	1	1,213	10,25
3	0,25	0,03	3,995	0,601	2	1,252	10,02
4	0,15	0,03	3,671		0	0,882	15,68
5	0,15	0,03	3,688	3,688	1	0,894	15,65
6	0,15	0,03	3,704	1,852	2	0,972	14,13
7	0,10	0,01	3,497		0	0,721	21,92
8	0,10	0,01	3,497	0,991	1	0,720	22,89
9	0,10	0,01	3,520	0,593	2	0,740	22,63
10	0,05	0,01	3,296		0	0,563	36,44
11	0,05	0,01	3,320	3,320	1	0,577	36,11
12	0,05	0,01	3,387	1,653	2	0,611	32,99

Fonte: adaptado de Scarf & Cavalcante (2012)

Ao fazer essa comparação, é possível perceber que a possibilidade de introduzir apenas 0,01 de q (Tabela 3.6) já causa alteração na política. Isso pode ser justificado pelo impacto considerável que q tem no custo – aumentando consideravelmente da política recomendada na linha 1 da Tabela 3.5 para as recomendadas nas linhas 7, 8 e 9 da Tabela 3.6 – ainda que esse valor de q seja muito pequeno. Ainda nessa análise, deve ser considerado o efeito de q nas variáveis de decisão K , Δ e T .

Quando se considera a possibilidade de introduzir defeito durante a inspeção (q), esta reflete na variável K , resultando em uma tendência de diminuição desta, em função da otimização do custo. Essa diminuição de K provoca um aumento nos valores da variável Δ .

Dos três resultados obtidos nas linhas 7, 8 e 9 da Tabela 3.6, os que apresentaram os menores custos ocorrem nas linhas 7 ($K = 0$) e linha 8 ($K = 1$). Embora ambos apresentem custos bem semelhantes, a recomendação de uma inspeção ($K = 1$) ainda apresenta o menor custo. Nesse caso, analisando do ponto de vista de otimização de custo, fazer uma inspeção ($K = 1$) é a melhor opção. O *MTBOF* também apresenta o melhor resultado para $K = 1$, porém, como não se tem certeza acerca da exatidão dos valores dos parâmetros p e q , é preferível que não se faça inspeção ($K = 0$), já que os custos quando $K = 0$ e $K = 1$ são praticamente iguais. Se existisse certeza acerca desses parâmetros, a recomendação de fato seria $K = 1$.

Comparando as linhas 7, 8 e 9 da Tabela 3.6 com a linha 6 do fornecedor B (Tabela 3.5) – que dispõe de uma menor proporção de componentes fracos que o fornecedor A – pode-se observar que a diminuição de p reflete nos custos, e isso pode ser atribuído ao custo extra que o fornecedor B arcar em função da redução de p .

É possível observar que, de acordo com os resultados demonstrados na Tabela 3.6, a decisão de fazer nenhuma ou uma inspeção, apresentam os melhores custos. As linhas 4 e 10 em que $K = 0$ apresentam dois, dos quatro menores custos da Tabela, já as linhas 2 e 8 em que $K = 1$ apresentam os outros dois menores custos.

Quando p e q apresentam valores muito próximos, como nas linhas 10, 11 e 12 da Tabela 3.6, a inspeção torna-se uma ação subótima, pois os valores de T e Δ assumem valores muito próximos, e isso faz com que os tempos de fazer a inspeção e o tempo até a substituição preventiva sejam praticamente iguais. Numa visão a longo prazo, a escolha por fazer inspeção aumenta os custos e reduz o *MTBOF*, o que torna a opção por fazer inspeção equivocada.

Diante do que foi apresentado, é possível concluir que é preferível não realizar nenhuma inspeção a realizar alguma inspeção com intuito de evitar falhas de instalação, pois ao realizar inspeções para evitar essas falhas, incorre-se no risco de introduzir defeitos.

Uma situação semelhante, que também utiliza a política *KAT* e população heterogênea de componentes para sistemas em três estados, é tratada por Scarf *et al.* (2009). No entanto, os autores consideram que as falhas no contexto de motor de tração ocorrem apenas em função da heterogeneidade dos componentes no ato da instalação.

Porém, aqui é feita uma analogia, considerando que uma instalação imperfeita pode transformar um componente forte em um componente fraco. E esta instalação imperfeita pode ter vários fatores associados a ela, como: falta de treinamento da equipe de manutenção; ferramentas inadequadas; pressão em função do tempo; procedimento dúbio; entre outras. Todos esses fatores podem contribuir para que o mantenedor execute um procedimento de forma imperfeita. Sendo assim, é de extrema importância que seja levado em consideração o aspecto do erro humano na instalação.

3.3 Inspeção e substituição imperfeita em sistema principal considerando a política *MT*

A próxima situação analisada considera o contexto de sistemas principais em três estados; inspeções e instalações sujeitas a erros e população heterogêneas de componentes, para o qual foi proposta uma política de manutenção *MT* por Berrade *et al.* (2013).

A política *MT* é uma política de inspeção e substituição, na qual M é a quantidade de intervenções realizadas, T é o intervalo de tempo em que elas ocorrem (dias) e MT está associado à substituição do sistema, que pode se dar de forma preventiva, ou ainda no caso de uma inspeção positiva para presença de defeito. Essa substituição renova o sistema.

Esse caso é utilizado no contexto de ferrovias, em que um trem é composto por 4 motores e 16 contadores por motor. O defeito ocorre quando um contador é sobreaquecido, mas ainda assim apresenta-se em estado funcional; já a falha de um contador, quando ele entra no estado de fusão, provoca uma queda de energia que resulta no desligamento do motor. Para identificar o estado dos contadores são feitas inspeções com intervalos de 25 dias de serviço.

Para o caso em questão, quando a inspeção é positiva, significa que o contador está superaquecido, então, é feita a uma substituição. A cada 1095 dias, ocorre uma manutenção programada, em que são substituídos preventivamente os contadores.

O grande questionamento acerca dessa situação é qual número de inspeções associado a um intervalo de tempo otimizam a substituição preventiva, considerando inspeções e substituições imperfeitas e população heterogênea de componentes.

Se o problema considerasse inspeções perfeitas, uma solução simples e natural seria aumentar o número de inspeções, para diminuir a probabilidade de falha. No entanto, é considerada a possibilidade de inserção de defeitos a partir de erros de julgamento. Assim sendo, a frequência das inspeções devem ser cautelosamente calculadas, visto que a confiabilidade e o custo com a manutenção do sistema dependem não só da frequência, mas também da qualidade das inspeções. Nesse sentido, o aumento na quantidade de inspeções pode provocar mais dano do que zelo, e quando se considera uma população heterogênea, as substituições podem resultar em uma redução da confiabilidade. Desse modo, a questão está acerca do que é apontado pelo senso comum e do que é realmente indicado fazer quando se considera todos os pressupostos.

Para isso, é feita uma análise na Tabela 3.7, a partir da qual é possível observar como a variação dos fatores p , β e α afetam na política e no custo do sistema.

Tabela 3.7 - Política de inspeção ótima.

Caso	Parâmetros de Mistura	Parâmetro de custo	Parâmetros de Inspeção		Política de ótimo custo		
	p	C_f	β	α	M	T /(dias)	Taxa de custo (100 dias)
1	0,0	5	0,0	0,0	1	327	0,537
2	0,13	5	0,2	0,0	2	178	0,673
Base	0,13	5	0,2	0,2	2	181	0,696
4	0,13	5	0,2	0,4	1	383	0,702
5	0,13	5	0,0	0,2	2	178	0,681
6	0,13	5	0,4	0,2	1	383	0,702
7	0,25	5	0,0	0,0	2	176	0,658
8	0,0	5	0,0	0,0	9	57	0,749
9	0,25	5	0,2	0,2	1	327	0,537
10	0,13	5	0,2	0,2	3	161	0,820
11	0,13	2	0,2	0,2	1	641	0,368
12	0,13	10	0,2	0,2	1	137	1,034
13	0,13	20	0,2	0,2	1	115	1,217
14	0,13	2	0,0	0,0	1	641	0,368

Fonte: adaptado de Berrade, et al. (2013)

Na política MT , quando $M = 1$, ela é de substituição pura. Nesse caso, não são feitas inspeções, elas estão inseridas apenas nos contextos em que $M > 1$, através de uma política de inspeção e substituição.

Comparando o caso base com as linhas 2 e 5, em que um dos parâmetros sofre uma redução (20%), ao ponto de um só parâmetro ser considerado; percebe-se que o parâmetro α

possui uma maior relevância que β , e isso é exteriorizado pela diferença nos custos provocados por ambos os parâmetros. No entanto, ao comparar o caso base com as linhas 4 e 6, em que um dos parâmetros recebe um aumento de 20%, não se observa nas linhas 4 e 5 mudanças, seja na política ou nos custos.

Analisando os efeitos que os erros de julgamento β e α provocam em M , é possível identificar que, quando se tem um aumento no falso positivo (β) ou no falso negativo (α), há uma redução no número de inspeções em M , como pode ser observado comparando o caso base (linha 3) com as linhas 4 e 6. Porém, fazendo essa mesma análise para os custos, pode-se observar que, ainda que o número de intervenções tenha sofrido uma diminuição (linhas 4 e 6), o custo sobre elas obteve um aumento. Isso significa que o aumento nos parâmetros β e α resulta em um aumento direto nos custos, corroborando com a relevância em considerar esses parâmetros.

Ao comparar o caso base com a linha 8, é possível perceber que, ao aumentar p e reduzir os parâmetros de inspeção, ocorre um aumento considerável em M . Isso é justificado porque uma maior quantidade de inspeções aumenta a probabilidade de identificação de componentes fracos, já que diminui o intervalo em que são feitas as intervenções.

Ao analisar os efeitos que os erros de julgamento e os parâmetros de mistura geram no custo (linhas 1 e 9), pode-se inferir que p tem uma maior representatividade nos custos, em relação aos erros de julgamento. Isso fica claro, ao se observar a semelhança nos custos de ambos os casos e perceber que a inserção de 0,2 em cada um dos parâmetros de erro de julgamento, em nada alterou o custo ou a política. Essa justificativa pode ser comprovada pela análise das linhas 3 e 9, em que apenas o valor de p aumenta (linha 3), e isso é suficiente para que se tenha um aumento nos custos e nas intervenções em M .

Ao analisar o caso base e a linha 7, que possuem $p = 13\%$, e comparar com as linhas 8 e 10, que possuem $p = 25\%$; tanto na primeira como na segunda situação, ocorre um aumento de 20% em β e α . Ao comparar o efeito desse aumento em ambas as situações, é possível identificar resultados diferentes. Na primeira situação, o aumento a alteração em β e α em nada modifica o número de intervenções em M . Porém, acarreta uma pequena mudança em T e no custo; já na segunda situação, ocorre uma redução significativa em M e uma alteração considerável em T e no custo. Nesse caso, o aumento significativo em p provoca uma redução no número de inspeções, como uma forma de reduzir a possibilidade de inserir defeito. Para essa análise, pode-se inferir que apenas proporções significativas em p resultam em mudanças na política.

Nas linhas 12 e 13, esperava-se que o aumento do custo da falha resultasse em uma maior quantidade de inspeções, já que β e α mantiveram-se constantes quando comparados com o caso base. No entanto, ocorre exatamente o oposto, e M reduz de dois para um (substituição pura). Uma explicação admissível é que o aumento da quantidade de inspeções aumentaria também o custo. Ao invés disso se preferiu reduzir o intervalo em que as substituições são feitas, para assim tentar anteceder-se à falha.

Uma situação semelhante, em que é preferível fazer a substituição pura, ocorre na linha 14, porém, nesse caso, a opção por essa política se deu em função do custo da falha ser baixo, porém há um aumento considerável no intervalo T .

4 APLICAÇÃO DA POLÍTICA *KAT*

Neste capítulo, é efetuada a aplicação da política *KAT* no estudo de caso tratado em Sultana & Karim (2015). Nesse trabalho, os autores tratam de um sistema principal, no qual aplicam uma política de substituição ótima por idade; porém, as populações de substituição são advindas de uma distribuição de mistura, e isso significa que subpopulações compõem uma população geral, em que se podem ter componentes fortes e fracos. A mistura de subpopulação pode resultar na ocorrência de uma falha antes do tempo, caso ocorra uma substituição por um componente fraco. Sendo assim, uma política que considera inspeções pode detectar se o componente estiver no estado defeituoso, e, ao fazê-lo, efetua uma substituição.

Diante disso, adotar uma política que considere inspeções, pode trazer melhorias significativas para o estudo de caso em questão, principalmente se for considerada a importância de inspeções em sistemas principais, nos quais a substituição ocorre através de uma população mista de componentes. É importante frisar o considerável custo de uma falha, que geralmente é muito maior do que o custo de uma manutenção preventiva e o custo de inspeção.

Para uma melhor compreensão, as seções iniciais do capítulo trazem os pressupostos e as fórmulas utilizadas na política *KAT*. Na sequência é feita a comparação entre os resultados obtidos através do trabalho de Sultana & Karim (2015) e a aplicação da política *KAT*, para esse mesmo estudo.

4.1 Pressupostos da política *KAT*

A política *KAT* foi aplicada, considerando os seguintes pressupostos:

- $f_x(x) = pf_1(x) + (1 - p)f_2(x)$, em que $f_1(x)$ e $f_2(x)$, respectivamente, seguem uma distribuição *Weibull*, com características de escala η_1, η_2 e de forma β_1, β_2 ;
- Os componentes podem estar em um dos três estados: bom, defeituoso ou falho;
- O sistema está no estado falho se o componente estiver no estado falho;
- O *delay time* H é independente do tempo de chegada do defeito X ;
- As inspeções são perfeitas e qualquer defeito presente é identificado;
- Os componentes defeituosos são substituídos instantaneamente e o custo médio de substituição de um componente defeituoso é C_p ;

- Na idade crítica de substituição T , a substituição preventiva de um componente é instantânea e o custo é: $C_p < C_f$;
- Os componentes falhos são imediatamente identificados, causam falha operacional do sistema e são substituídos instantaneamente pelo custo C_f ;
- O custo da inspeção é $C_i < C_f$;
- Na substituição (independentemente do estado do componente substituído), o sistema é restaurado para o novo estado.

4.2 Fórmulas utilizadas na política KAT

As fórmulas apresentadas na sequência foram desenvolvidas por Scarf *et al.* (2009), através da política KAT , em que a duração esperada de renovação de um ciclo $E(V)$ é calculada a partir de:

$$E(V) = \sum_{i=1}^K i\Delta \left[\int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} (1 - F_H(i\Delta - x)) f_X(x) dx \right] + \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_0^{i\Delta-x} (x+h) f_H(h) f_X(x) dh dx \\ + \int_{K\Delta}^T \int_0^{T-x} (x+h) f_H(h) f_X(x) dh dx + T \left[\int_{K\Delta}^T (1 - F_H(T-x)) f_X(x) dx + \int_T^{\infty} f_X(x) dx \right].$$

O custo esperado da renovação de um ciclo $E(U)$ é calculado a partir de:

$$E(U) = \sum_{i=1}^K (iC_I + C_R) \left[\int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} (1 - F_H(i\Delta - x)) f_X(x) dx \right] + \sum_{i=1}^K [(i-1)C_I + C_F] \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} F_H(i\Delta - x) f_X(x) dx \\ + (KC_I + C_F) \int_{K\Delta}^T (F_H(T-x)) f_X(x) dx + (KC_I + C_R) \left[\int_{K\Delta}^T (1 - F_H(T-x)) f_X(x) dx + \int_T^{\infty} f_X(x) dx \right].$$

Por fim, a política ideal de inspeção e substituição para componentes de uma população heterogênea utiliza as expressões $E(U)$ e $E(V)$, a fim de reduzir o custo a longo prazo por unidade de tempo. Para tal, utiliza-se:

$$C_{\infty}(T, \Delta, K) = \frac{E(U)}{E(V)}$$

Em que X – idade do componente na chegada do defeito; f_x – função densidade de probabilidade de X ; F_x – função de distribuição cumulativa de X ; H – tempo de chegada do defeito até a falha; f_H – função densidade de probabilidade de H ; F_H – função de distribuição cumulativa de H ; $E(U)$ – custo esperado para renovação de um ciclo; $E(V)$ – duração esperada para renovação de um ciclo; $C_{\infty}(\cdot)$ – custo a longo prazo por unidade de tempo; p – parâmetro de mistura; ρ – probabilidade da substituição de um ciclo resultar em falha; η_i – parâmetro de

escala para componentes de subpopulação $i = 1, 2$; β_i – parâmetro de forma de componentes da subpopulação $i = 1, 2$.

4.3 Comparação dos resultados da aplicação da política de substituição por idade com a política $K\Delta T$ para vários valores de C_f e C_p

A Tabela 4.1 apresenta os valores ótimos relacionados ao tempo representado por T e ao custo representado por $J(T)$, para diversos valores de C_f e C_p . A Tabela considera a política de substituição por idade e será comparada com a Tabela 4.2, que apresenta os resultados após a aplicação da política $K\Delta T$.

Nesse capítulo, a nomenclatura utilizada para os parâmetros da política $K\Delta T$ sofreu uma pequena variação, de modo a ficar consistente com a nomenclatura adotada no trabalho de Sultana & Karim (2015). A aplicação da política de substituição por idade considera C_f (custo da manutenção após a falha) para os valores 300, 400 e 500; C_p (custo da manutenção preventiva) variando no intervalo [10 – 25], com incremento de cinco unidades para os casos em que $C_f = 300$ ou 400, e para o caso em que $C_f = 500$, C_p varia no intervalo [25 – 100], com incremento de vinte e cinco unidades. A variável T representa o tempo em dias, e $J(T)$ representa o custo/vida útil de T . Os parâmetros utilizados são $\beta_1 = 4,0446598$, $\beta_2 = 1,3559817$, $\eta_1 = 801,1941526$, $\eta_2 = 880,8844635$, $p_1 (p) = 0,4754753$ e $p_2 (1-p) = 0,5245247$.

Tabela 4.1 – Custos e idade ótimos da política de substituição por idade para $C_f = 300$ e diferentes valores de C_p

C_p	10	15	20	25
T	230	281	318	347
$J(T)$	0,152	0,169	0,187	0,199

Fonte: adaptado de Sultana & Karim (2015)

As Tabelas 4.2, 4.4 e 4.6 apresentam os resultados da aplicação para política $K\Delta T$, em que são apontados os valores ótimos para C_i (custo da inspeção), K (número de inspeções), Δ (intervalo entre as inspeções), T (tempo) e $J_{K\Delta T}$ (custo/vida útil na política $K\Delta T$). As Tabelas 4.2, 4.4 e 4.6 consideraram os valores do C_f e do C_p utilizados na política de substituição por idade, além disso, é acrescentado o custo de inspeção.

A Tabela 4.2 considera o C_f (300) e C_p com uma variação de 10 a 100 – em que as estimativas de 50 a 100 são úteis para avaliar cenários que vão além dos referidos na Tabela

4.1. O custo da inspeção (C_i) é 10% do custo da manutenção preventiva e J_{KAT} – custo/vida útil – considera os valores ótimos das variáveis K , Δ e T .

O modelo KAT possibilita encontrar os valores ótimos respectivos dessas variáveis. Para isso, foi utilizado o cálculo através das fórmulas que se encontram no tópico 4.3.

Tabela 4.2 – Aplicação da política KAT para $C_f = 300$

C_p	10	15	20	25	50	75	100
C_i	1	1,5	2	2,5	5	7,5	10
Δ	2,8	0	0,6	2,2	3	1,8	1,4
T	240	265	295	365	475	585	650
K	1	1	1	1	1	1	1
J_{KAT}	0,085	0,104	0,118	0,135	0,196	0,241	0,28

Fonte: esta pesquisa (2017)

A partir da análise das Tabelas 4.1 e 4.2, é possível identificar que para os diversos valores de C_f e C_p , em ambas as tabelas, o J_{ATK} correspondente obtido com a aplicação da política KAT , obteve uma redução significativa no custo quando comparado com a Tabela 4.1. Ao analisar o tempo de substituição preventiva (T), quando o $C_p = 10$ ou 25 , o T apresenta melhores resultados na política KAT ; porém, quando $C_p = 15$ ou 20 , a política de substituição por idade apresenta um maior tempo para a substituição em T .

A Tabela 4.3 considera o $C_f = 400$ e o aumento no C_f resulta em uma redução do tempo até a manutenção preventiva, pois, quanto mais cara for a manutenção preventiva, mais se quer evitá-la; e uma maneira é reduzir o tempo da substituição preventiva. Outra maneira seria a introdução de inspeções ao longo da vida útil do componente, porém a política adotada não admite inspeções.

Tabela 4.3 – Custos e idade ótimos da política de substituição por idade para $C_f = 400$ e diferentes valores de C_p

C_p	10	15	20	25
T	196	245	281	309
$J(T)$	0,187	0,208	0,226	0,243

Fonte: adaptado de Sultana & Karim (2015)

Ao comparar as Tabelas 4.3 e 4.4, é possível identificar que essa ultima, que expõe os resultados da aplicação da política KAT , apresenta todos os valores de T superiores ao da

política de substituição por idade. Isso significa que a idade/tempo de substituição preventiva é maior na política que considera as inspeções. Quanto aos valores dos $J(T)$ e J_{KAT} , mesmo com os custos acerca das inspeções, que são próprias da política KAT ; ainda assim, esta traz valores mais satisfatórios para todos os J_{KAT} , especialmente quando $C_p = 15$, pois, ainda que se tenha o custo associado a três inspeções, o J_{KAT} ótimo apresenta um valor consideravelmente inferior quando comparadas as Tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.4 – Aplicação da política KAT para $C_f = 400$

C_p	10	15	20	25	50	75	100
C_i	1	1,5	2	2,5	5	7,5	10
A	1,4	0,8	1,8	3	2,6	1	3
T	210	265	325	355	510	525	560
K	1	3	1	1	1	1	1
J_{KAT}	0,094	0,117	0,143	0,158	0,226	0,283	0,326

Fonte: esta pesquisa (2017)

A Tabela 4.5 considera o $C_f = 500$ e C_p variando no intervalo [25 – 100], e a Tabela 4.6 considera a aplicação da política KAT para os mesmos valores C_f e C_p utilizados na política de substituição por idade.

Tabela 4.5 – Custos e idade ótimos da política de substituição por idade para $C_f = 500$ e diferentes valores de C_p

C_p	25	50	75	100
T	281	372	431	479
$J(T)$	0,283	0,353	0,407	0,456

Fonte: adaptado de Sultana & Karim (2015)

Ao comparar as Tabelas 4.5 e 4.6, é possível perceber a proximidade entre os três primeiros valores de T em ambas as Tabelas. Assim, se a decisão sobre a adoção de um tipo de política considerasse apenas o tempo de substituição preventiva (T), poderia ocorrer uma indiferença entre a escolha pela política, principalmente na comparação para T , quando $C_p = 25$, já que os valores de T são semelhantes. Todavia, existe um critério muito importante para escolha da variável de decisão, que é $J(T)$, para o caso da política de substituição por idade; e J_{KAT} , para a política KAT . Sendo assim, e analisando ambas as variáveis, é possível inferir que para quando os valores de C_p são 25, 50 e 75 é preferível a política KAT .

Tabela 4.6 – Aplicação da política $K\Delta T$ para $C_f = 500$ e C_p variando de 25 - 100

C_p	10	15	20	25	50	75	100
C_i	1	1,5	2	2,5	5	7,5	10
Δ	1,8	2	0,8	2,6	2,6	2,2	2
T	200	205	240	280	360	420	580
K	1	1	2	1	1	1	1
$J_{K\Delta T}$	0,102	0,131	0,149	0,172	0,252	0,307	0,364

Fonte: esta pesquisa (2017)

Fazendo uma comparação entre as duas políticas aqui referenciadas, foi possível identificar que para os três cenários de C_f (300, 400 e 500) e para os diferentes valores assumidos por C_p nesses cenários, os valores atribuídos a $J_{K\Delta T}$ superam todos os valores atribuídos $J(T)$ e a maioria dos valores atribuídos T na política $K\Delta T$ também supera os valores de T na política de substituição por idade. Assim os indicativos apontam que a política $K\Delta T$ apresenta vantagens sobre a política de substituição por idade.

Ao escolher uma política de manutenção específica, o gerente de manutenção deve considerar, além dos seus objetivos – que geralmente estão associados a redução de custo ou aumento de confiabilidade – a credibilidade da sua equipe de manutenção, pois esse fator é de grande importância visto que, algumas políticas que consideram inspeções como é o caso da $K\Delta T$, não consideram a possibilidade de inspeções imperfeitas, no entanto se o gerente de manutenção não dispuser de uma equipe suficientemente treinada e especializada, essa pode ao invés de solucionar, inserir uma falha no sistema.

Assim, se a política $K\Delta T$ considerasse a possibilidade de inspeções imperfeitas, seria provável que a política de substituição por idade fosse considerada melhor que a política $K\Delta T$, pois as inspeções imperfeitas trazem consigo o risco da falha, e esta por sua vez, possui um alto custo.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Na atualidade, no que diz respeito à área da manutenção em indústrias, o foco é o alto investimento em sistemas tecnológico; porém, não se pode esquecer que novas tecnologias trazem consigo novas formas para mantê-las. Assim, as equipes de manutenção devem passar por novos treinamentos para capacitá-las a executar sua função. No entanto, através da inserção de novas tecnologias, podem surgir oportunidades para ocorrências do erro humano na manutenção. Esse erro pode gerar desde efeitos simples até um acidente, que, por sua vez, pode resultar em sérias e irreversíveis consequências.

Na tentativa de reduzir o erro humano e, conseqüentemente, um possível acidente, é importante analisar a relevância de considerar o fator humano (que pode se expressar através do erro de julgamento, inspeção ou instalação imperfeita) em modelos matemáticos de manutenção, visto que esse pode alterar tanto os custos como a confiabilidade do sistema. Alguns dos motivos que podem levar os gerentes de manutenção a desconsiderar o erro humano nos modelos são o desconhecimento do erro ou ainda sua irrelevância, em função dos custos e da confiabilidade.

O problema do desconhecimento do erro é que ele pode estar presente e causar um aumento nos custos e/ou uma redução na confiabilidade. Outro problema é que alguns modelos, na literatura, consideram ações como inspeções e/ou instalações perfeitas. No entanto, essas considerações podem distanciar os modelos de uma aplicação real.

Não é simples rastrear os fatores que levam ao erro humano, pois eles podem estar relacionados tanto a fatores associados ao trabalho, como, a fatores que envolvem a vida pessoal do mantenedor. Porém, os fatores associados ao trabalho merecem uma maior atenção por parte das empresas, entre os quais estão: a falta de treinamento da equipe de manutenção; a pressão associada ao tempo de execução de uma atividade; o procedimento dúbio e o uso de ferramentas inadequadas. Esses são aspectos sobre os quais as empresas podem agir para tentar reduzir a ocorrência do erro humano na manutenção. Podem fazê-lo através de treinamentos e reciclagens periódicas com a equipe de manutenção, descrevendo procedimentos de forma clara e mantendo as ferramentas em bom estado de uso, além de seguir as diretrizes indicadas em um modelo de manutenção específico, que incorpore o fator humano, se relevante.

Sabendo que as políticas aqui abordadas podem ser adaptadas para outros contextos que compartilhem dos mesmos pressupostos, espera-se que o trabalho possa, não só contribuir para a literatura, como também seja relevante para os gestores de manutenção nas indústrias,

no sentido de considerar a possibilidade de manutenção imperfeita e, assim, poder adotar medidas que possam minimizar os fatores contribuintes.

Estudos futuros deverão englobar a conscientização dos setores de manutenção a respeito de erros humanos, visto que desconsiderá-los no modelo pode se dar pela falta de conhecimento acerca dele.

Como perspectiva de trabalhos futuros, propõe-se fazer uma análise, a fim de identificar a frequência e a relevância do erro humano no sistema. A análise pode ser feita através de estatística descritiva, e dessa forma é possível identificar a relevância de inserir ou não o erro humano no modelo. Por outro lado, muitas vezes pode existir a presença de erros potenciais de causar consequências que não são identificados. Por esta razão é muito importante observar como esses erros podem influenciar no desempenho e nos custos da manutenção. Na sequência, recomenda-se ampliar o estudo fazendo aplicação em casos reais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. T ; FERREIRA, R. J. P ; CAVALCANTE, C. A. V. A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability. *IMA Journal of Management Mathematics*. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro, p.37, 1994.
- ALMEIDA, A.T; SOUZA, F.C.M. Gestão da manutenção na direção da Competitividade. Recife, Editora Universitária. 2001.
- ALRABGHI, A. TIWARI, A. State of the art in simulation-based optimization for maintenance systems. *Computers & Industrial Engineering*, 82: 167-182, 2015.
- AVEN, T; JENSEN, U. Stochastic Models in Reliability. Springer, New York, 1999.
- ASLETT, L.J.M; Nagapetyan, T; VOLLMER, S.J. Multilevel Monte Carlo for Reliability Theory. *Reliability Engineering & System Safety*. 165: 188-196, 2017.
- ALVES, R.P; FALSARELLA, O.M. Modelo conceitual de inteligência organizacional aplicada à função manutenção. *Gestão & Produção*, 16(2): 313-324, 2009.
- ALSYOUF, I; The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. *Int J Prod Econ* 105(1):70-78, 2007.
- BARATA, C.J; GUEDES, S; MARSEGUERRA, M; ZIO, E. Simulation modeling of repairable multi-component deteriorating systems for on condition maintenance optimization. *Reliability Engineering System & Safety*, 76(3): 255-264, 2002.
- BELHOT, R.V; CAMPOS, F.C. Relações Entre Manutenção e Engenharia de Produção: uma Reflexão. *Production*, 5(2): 125-134, 1995.
- BENNETT, S. Risk Management. *Risk Management*, 6(1): 69-71, 2004.
- 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* 218, 716-725, 2012.
- BERRADE, M.D; SCARF, P.A; CAVALCANTE, C.A.V. A study of postponed replacement in a delay time model. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017.
- BERRADE, M.D; SCARF, P.A; CAVALCANTE, C.A.V; DWIGHT,R.A. Imperfect inspection and replacement of a system with a defective state: A cost and reliability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 120,80-87, 2013.
- BLOOM, N. B. Reliability Centered Maintenance: implementation made simple. New York: McGraw-Hill, 2006.

-
- BOGONOVO, E; MARSEGUERRA, M; ZIO, E. A Monte Carlo methodological approach to plant availability modelling with maintenance, aging and obsolescence. *Reliability Engineering & System Safety*, 67(1): 61 – 73, 2000.
- BORGES, F.M; MENEGON, N. L. Fator humano: confiabilidade às instabilidades do sistema de produção. *Gepros*, 4(4), 37-48, 2009.
- BROWN, M; PROSCHAN, F. Imperfect Repair. *Journal of Applied Probability*, 20 (4):851-859, 1983.
- CAVALCANTE, C. A. M. T.; FLEURY, A. O conceito de evento na análise organizacional das atividades de manutenção corretiva. EPUSP, 1999.
- CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando o PROMETHE II em situações de incerteza. *Pesquisa Operacional*, 25(2): p.279-296, 2005.
- CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. A Multicriteria Decision Aiding Model Using Promethee III For Preventive Maintenance Planning Under Uncertain Conditions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 13, 385-397, 2007.
- CARVALHO, A.L; MENEGON, N.L. O trabalho invisível e perigoso dos profissionais de manutenção: reflexões sobre a atividade em uma indústria automobilística. *Production*, 2013.
- CERVO, A.L; BERVIAN, P.A; SILVA, R.D. *Metodologia científica*. 6. ed. São Paulo, Person Prentice Hall, p.162, 2007.
- CHANGA, J. I; LIN, C. C. A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19(1): 51–59, 2006.
- CHEN, T; POPOVA, E. Maintenance policies with two dimensional warranty. *Reliab Eng Syst Saf*. 77(1):61–69, 2002.
- CHUNG, S.H; LAU,H.C.W; HO,G.T.S; IP,W.H. Optimization of system reliability in multi-factory production networks by maintenance approach. *Expert System with Applications*, 36(6):10188-10196, 2009.
- CHRISTER, A.H. Developments in delay time analysis for modeling plant maintenance, *Journal of the Operational Research Society*, 50(1): 1120–1137, 1999.
- CORREA, C.R.P; JUNIOR, M.M.C. Análise e classificação dos fatores humanos nos acidentes industriais. 17(1): 186-198, 2007.
- DELOUX, E; CASTANIER, B; BÉRENGUER, C. Predictive maintenance policy for a gradually deteriorating system subject to stress. *Reliability Engineering & System Safety*, 94 (2), 418-431, 2009.
- DHILLON, B. S; LIU. Y. Human error in maintenance: a review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(1): 21-36, 2006.

-
- DING, S.H.; KAMARUDDIN, S. Maintenance policy optimization - literature review and directions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76:1263–1283, 2015.
- EMBREY, D.E. Incorporating management and organizational factors into probabilistic safety assessment. *Reliability Engineering and System Safety* 38,199-208, 1992.
- FAJER, M; ALMEIDA. I. M; FISCHER, F. M . Fatores contribuintes aos acidentes aeronáuticos. *Saúde Pública*, vol.45 n.2 São Paulo, 2011.
- FERREIRA, R.J.P. ; DE ALMEIDA, A.T; CAVALCANTE, C. A. V. A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis. *Reliability Engineering & Systems Safety*. 94, 905-912, 2009.
- FLAGE, R. A delay time model with imperfect and failure-inducing inspections. *Reliability Engineering & System Safety*, 114:1-12, 2014.
- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. São Paulo: Campus; Elsevier, p.110, 2009.
- GHOSH, D; ROY, S. Maintenance optimization using probabilistic cost-benefit analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(4):403-407, 2009.
- GIL, A.C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 4 ed. Atlas São Paulo. p. 207, 1995.
- HAGUENAUER, L. O complexo químico brasileiro: Organização e dinâmica interna, *Instituto de Economia Industrial*. p. 112, 1986.
- HELMREICH, R.L. Building safety on the three cultures of aviation. In: *Proceedings of the IATA Human Factors Seminar*, 39- 43, 1999.
- HOLLNAGEL, E; WOODS, D. D; LEVESON, N. *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Farnham, Surrey: Ashgate, 2006.
- HURST, N.W; BELLAMY, L.J; GEYER, T.A.W; ASTLEY, J.A; A classification scheme for pipework failures to include human and sociotechnical errors and their contribution to pipework failure frequencies. *Journal of Hazardous Materials* 26, 159–186, 1991.
- YOUNG, M.J. Human performance model validation: one size does not fit all. *Summer Computer Simulation Conference*, 732–735, 2003.
- JIA, X; CHRISTER, A.H. A periodic testing model for a preparedness system with a defective state. *IMA Journal of Management Mathematics*, 13, 39-49, 2002.
- KHAN, F.I; ABBASI, S.A. Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 12, 361–378, 1999.
- LATORELLA, K. A; PRABHU, P. V. A review of human error in aviation maintenance and inspection. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 26,133-161, 2000.

-
- LIAO, G-L. Optimum policy for a production system with major repair and preventive maintenance. *Applied Mathematical Modelling*, 36(11):5408-5417, 2012.
- LEITE, A. P.C. Planejamento de manutenção para aparelho de mudança de vias, considerando possibilidade de erros. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- LU, X; WANG, W; YANG, H; ZUOM, J; ZHOU, D. Optimizing the periodic inspection interval for a 1-out-of-2 cold standby system using the delay-time concept, *Quality and Reliability Engineering International*, 28, 648-662, 2012.
- MACHADO, M. P. N. M. *Manutenção preventiva de um edifício hospitalar*. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.
- MAHADEVAN, M.L; ROBERT, P.T; SHIDHAR, V. Optimizing maintenance activities using HGA AND Monte Carlo Simulation. *International Journal of Computer Applications*, 1(21):106-110, 2010.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. *Técnicas de pesquisa*. 7 ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- MARSEGUERRA, M; ZIO, E. Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and Monte Carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, 68(1): 69-83, 2000.
- MECHEFSKE, C.K.; WANG, Z. Using fuzzy linguistics to select optimum maintenance and condition monitoring strategies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(6):1129–1140, 2001.
- MIRSHAWKA, V; OLMEDO, N. L. *Manutenção – Combate aos custos da não eficácia – A vez do Brasil*. São Paulo: Editora Makron Books do Brasil Ltda., 1993.
- MOURA, C. M; ROCHA, S.P.V; DROGUETT, E.L; JACINTO, C.M. Avaliação bayesiana da eficácia da manutenção via processo de renovação generalizado. *Pesquisa Operacional*, 27(3): 569-589, 2007.
- MOUBRAY, J. Reliability centered maintenance. Industrial Press Inc. New York. 2 ed. p.440, 1997.
- NANCABÚ, P. *Procedimento para manutenção preventiva na empresa de resíduos sólidos urbanos do centro “ERSUC”*. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2011.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). *NASA Safety Center, System Failure Case Study: The Case for Safety* 7(4), 2013.
- NAKAGAWA, T. Sequential imperfect preventive maintenance policies. *IEEE Transactions on Reliability* 37(3) 295-308, 1998.

-
- NEBOT, M. Abordagem dos Fatores Humanos na Prevenção de Riscos do Trabalho *in* Caminhos da análise de acidentes do trabalho. p.105, 2003.
- NEPOMUCENO, L. X. Manutenção Preditiva em Instalações Industriais: procedimentos técnicos. São José dos Campos, Edgard Blücher, p.521,1985.
- NGUYEN, D. Q.; BRAMMER, C.; BAGAJEWICZ, M. New tool for the evaluation of the scheduling of preventive maintenance for chemical process plants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(6):110-124, 2008.
- NIVOLIANITOU, Z. KONSTANDINIDOU, M. MICHALIS,C. Statistical analysis of major accidents in petrochemical industry notified to the major accident reporting system (MARS). *Journal of Hazardous Materials A*, 137 1-7, 2006.
- OKOH, P. Maintenance Strategies for Major Accident Prevention. Trondheim, 179 p. (Doctor – Norwegian University of Science and Technology/NTNU), 2015.
- OKOH, P; HAUGEN, S. The influence of maintenance on some selected major accidents. *Chemical Engineering Transactions*, 31, 493-498, 2013a.
- OKOH, P; HAUGEN, S. Maintenance-related major accidents: Classification of causes and case study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6): 1060-1070, 2013b.
- PEINADO, J; GRAEML, A.R. Administração da produção: operações industriais e de serviços. Curitiba : UnicenP, p.750, 2007.
- PENG, Y.; DONG, M.; ZUO, M.J. Current status of machine prognostics in condition- -based maintenance - a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34:1181–1193, 2010.
- PHAM, H; WANG, H. Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research*, 94, 425-438, 1996.
- PERROW, C. Normal Accidents: Living with High-Risk Technology. Princeton, New Jersey: Princeton University Press. ISBN: 0691004129, p.466, 1999.
- RASMUSSEN, J. Skills, rules, and knowledge: signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions: Systems, Man & Cybernetics*,13,257-267,1983.
- REASON, J; MADDIX, M.E. *Human error*. U.S. Department of Transportation, Washington, DC (Chapter 14). 1995.
- REASON, J; *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Ashgate Publishing, p.254, 1997.
- REASON, J. Safety paradoxes and safety culture. *Injury Control & Safety Promotion*, 7(1): 3-14, 2000a.

-
- REASON, J. Human error: models and management. *British Medical Journal*, 320(7237): 768-770, 2000.
- REASON, J; HOBBS, A. Managing Maintenance Error: A Practical Guide. *An International Journal*, 6(1): 67-71, 2004.
- RAUSAND, M. Reliability Centered Maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*. 60(2):121-132, 1998.
- SABAEI, D; ERKOYUNCU,J; ROY,R. A review of multi-criteria decision making methods for enhanced maintenance delivery. *Procedia CIRP* 37, 30 – 35, 2015.
- SALES, J; MUSHTAQ, F; CHRISTOU, M.D; NOMEN, R. Study of Major Accidents Involving Chemical Reactive Substances: Analysis and Lessons Learned. *Process Safety and Environmental Protection*,85(2):117-124, 2007.
- SANTOS,W.B; COLOSIMO, E.A; MOTTA, S.B. Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório. *Gestão & Produção*, 14(1): 193-202, 2007.
- SCARF, P.A; CAVALCANTE, C.A.V; DWIGHT, R.A; GORDON, P. An Age-Based Inspection and Replacement Policy for Heterogeneous Components, *IEEE Transactions on Reliability*, 58 (4): 641-648, 2009.
- SCARF,P.A; CAVALCANTE, C.A.V. Modelling quality in replacement and inspection maintenance. *Int. J. Production Economics*, 135, 372–381, 2012.
- SHAPPELL, S.A; WIEGMANN, D.A. The Human Factors Analysis and Classification System–HFACS. Office of Aviation Medicine Federal Aviation Administration. Springfield, Virginia, p.19, 2000.
- SHARMA, A, YADAVA, G.S, DESHMUKH, S.G; A literature review and future perspectives on maintenance optimization. *Jornal Quality Maintenance Engineers*, 17(1):5–25, 2011.
- SLACK, N. Vantagem Competitiva em Manufatura: atingindo competitividade nas operações industriais. São Paulo, Atlas, p.198, 1993.
- SLACK, N., CHAMBERS S., JOHNSTON R. Administração da Produção. São Paulo, Atlas, p.748, 2002.
- SMITH, E.J; HARRIS, M.J The role of maintenance management deficiencies in major accident causation. *Journal of Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 206: 55-66, 1992.
- SUCHMAN, E.A. A conceptual analysis of the accident problem, social problems. IN: Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, assesment and control. 8(3) 441. 1961.
- SULTANA, N; KARIM, M.R. Optimal Replacement Age and Maintenance Cost: A Case

-
- Study. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 4(2): 53-57, 2015.
- TERSINE, R.J. Production/operations management: concepts, structure, and analysis. Elsevier Science Publisher, New York, p.766, 1985.
- UTH. H-J. Trends in major industrial accidents in Germany. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 12, 69–73, 1999.
- VASILI, V.; HONG, T.S.; ISMAIL, N.; VASILI, M. Maintenance optimization models: a review and analysis. In: Proceedings Of The 2011 International Conference On Industrial Engineering And Operations Management, 1131-1138, 2011.
- VINODH, S; VARADHARAJAN, A.R. Application of fuzzy VIKOR for concept selection in agile environment. *Int J Adv Manuf Technol* 42:1025–1033, 2012.
- VINNEM, E.J; HAUGEN, S; OKOH, P. Maintenance of petroleum process plant systems as a source of major accidents?. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, 348-356, 2016.
- XENOS, H.G. *Gerenciando a Manutenção Produtiva*. Editora de Desenvolvimento Gerencial, p. 149, (1998).
- WAEYENBERGH, G; PINTELON,L. A framework for maintenance concept development. *Int J Prod Econ* 77(3):299–313, 2002.
- WANG, W; 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*, 35, 2855-2863, 2011.
- WANG, W. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling. *Reliability Engineering and System Safety*, 106, 165-178, 2012.
- WANG W. An inspection model for a process with two types of inspections and repairs. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 526–533, 2009.
- WANG, W. Delay Time Modelling. Springer London. p. 345-370, 2008.
- ZHOU, X; XI,L; LEE,J. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(4):530–534, 2007.