



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

MÔNICA FRANK MARSARO

MODELOS DE MANUTENÇÃO BASEADOS EM OPORTUNIDADE
CONSIDERANDO INSPEÇÃO IMPERFEITA E MÚLTIPLOS CRITÉRIOS

Recife

2019

MÔNICA FRANK MARSARO

**MODELOS DE MANUTENÇÃO BASEADOS EM OPORTUNIDADE
CONSIDERANDO INSPEÇÃO IMPERFEITA E MÚLTIPLOS CRITÉRIOS**

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

Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.

Recife

2019

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

M363m Marsaro, Mônica Frank.
Modelos de manutenção baseados em oportunidade considerando inspeção imperfeita e múltiplos critérios / Mônica Frank Marsaro. – 2019.
144 folhas, il., gráfs., tabs.

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

1. Engenharia de Produção. 2. Manutenção oportuna. 3. Inspeção imperfeita. 4. Modelo matemático. 5. Apoio à decisão multicritério. 6. Teoria de valor multiatributo. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virgínio. (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-370

MÔNICA FRANK MARSARO

**MODELOS DE MANUTENÇÃO BASEADOS EM OPORTUNIDADE
CONSIDERANDO INSPEÇÃO IMPERFEITA E MÚLTIPLOS CRITÉRIOS**

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA PARECER DA COMISSÃO
EXAMINADORA PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA PARECER DA
COMISSÃO EXAMINADORA COMISSÃO EXAMINADORA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Pesquisa Operacional

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera a candidata Mônica Frank Marsaro Aprovada.

Recife, 02 de Agosto de 2019.

Prof. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante, Doutor (UFPE)

Profª. Ana Paula Cabral Seixas Costa, Doutora (UFPE)

Profª. Caroline Maria de Miranda Mota, Doutora (UFPE)

Prof. Gilberto Francisco Martha de Souza, Doutor (USP)

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, Doutor (UFRGS)

AGRADECIMENTOS

São muitos àqueles que é preciso agradecer, que de alguma forma contribuíram para a conclusão desse trabalho.

À Deus, ser supremo de tudo. A fé faz com que as dificuldades sejam enfrentadas e que não se desista no meio do caminho na busca pelos objetivos.

À minha família, Jacinto, Lisete e Eduardo, que mesmo distantes estiveram presente apoiando e dando forças para terminar o doutorado. Ao meu esposo, por incondicional apoio, pelos momentos de dificuldades que foram enfrentados juntos.

Ao meu orientador, Prof. Cristiano A. V. Cavalcante, pelos ensinamentos e direcionamentos durante a execução do trabalho. Aos demais professores do programa de pós-graduação em Engenharia de Produção da UFPE, pelo compartilhamento de conhecimento ao longo do curso.

Aos amigos que fiz durante a minha passagem por Recife, em especial Mirian, Márcia Porto, Gustavo e Ciro José. Aos colegas do Random e aos demais colegas do PPGEF que convivi durante esses anos, por todo o apoio.

Aos meus amigos de São Luís pelo apoio durante o processo de doutoramento, e aos colegas da UEMA por entenderem a demanda de tempo para execução desse trabalho.

RESUMO

Decisões no âmbito de gestão da manutenção podem repercutir em consequências para as empresas, tanto para o custo quanto para a confiabilidade das operações, o que faz com que a definição de uma política de manutenção mais adequada ao contexto analisado seja de suma importância. A literatura tem mostrado que a utilização de manutenção oportuna para definição da política de manutenção tem proporcionado bons resultados relacionados a custo e confiabilidade. Outrossim, avaliar periodicamente o estado do componente através de inspeções pode ser uma boa maneira para evitar falhas, porém, nem sempre, as ações de inspeção são perfeitas, assim, uma probabilidade de que ocorram erros precisa ser considerada. Dessa forma, a presente tese apresenta o desenvolvimento de um modelo analítico de minimização da taxa de custo de manutenção por unidade de tempo, que também calcula o tempo médio entre falhas operacionais, cuja principal contribuição é a consideração de inspeção imperfeita. A fim de investigar o impacto que a qualidade da inspeção possui nos resultados, foi realizada uma aplicação numérica que considera 3 cenários, em que, no primeiro, todas as ações de manutenção são realizadas por uma equipe local, com custos de manutenção e qualidade das inspeções mais baixos, o segundo, considerando que as ações são realizadas por uma equipe especializada, com custos e qualidade de inspeção mais elevados. O terceiro cenário se trata da utilização de ambas as equipes com funções diferentes, o que proporcionou a possibilidade de uma adaptação para o modelo analítico. Além disso, um modelo de decisão multicritério utilizando MAVT foi desenvolvido para a determinar a melhor política de manutenção, considerando como critérios a taxa de custo de manutenção por unidade de tempo e o tempo médio entre falhas operacionais.

Palavras-chave: Manutenção oportuna. Inspeção imperfeita. Modelo matemático. Apoio à decisão multicritério. Teoria de valor multiatributo.

ABSTRACT

Maintenance management decisions can have repercussions in consequences for the companies for the operation cost and reliability, which means that the definition of the maintenance policy more appropriate to the analysed context has a great importance. The literature has been showed that the use of the opportunistic maintenance for to define the maintenance policy has provided good results related to cost and reliability. Moreover, evaluate periodically the state of the component through inspections can be a good way to avoid failures, but inspections actions are not always perfect, and a probability of errors can be considered. Thus, the present thesis present the development of an analytical model for the minimization of the maintenance cost-rate per unit time, which also calculates the mean time between operational failures, whose main contribution is the consideration of imperfect inspection. In order to investigate the impact of inspections quality in the results of the model, a numerical application was carried out considering 3 situations, firstly all the maintenance actions are performed by a local team with maintenance costs and inspection quality lower, in the second situation, the maintenance actions are performed by a specialized team, with cost and inspections quality higher. The third situation deals the use of both teams with different functions, which provide the possibility of adaptation for the analytical model. In addition, a multicriteria decision model using MAVT was developed to determine the best maintenance policy considering with criteria the maintenance cost-rate per unit time and the mean time between operational failures.

Keywords: Opportunity maintenance. Imperfect inspection. Mathematics model. Multicriteria decision model. Multi-attribute value theory.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema representativo da definição de <i>delay-time</i>	31
Figura 2 – Exemplo para análise de <i>delay-time</i>	32
Figura 3 – Representação dos possíveis estágios do equipamento.....	63
Figura 4 – Representação do status do componente em uma inspeção	64
Figura 5 – Representação das variáveis de decisão do modelo.....	65
Quadro 1- Comparativo entre as características do modelo simulado e modelo analítico.....	67
Quadro 2- Siglas utilizadas no modelo de minimização da taxa de custo.....	69
Figura 6 – Representação da renovação do componente em uma inspeção antes de $M\Delta$, devido um verdadeiro positivo	70
Figura 7 – Representação da renovação do componente em uma inspeção depois de $M\Delta$, devido um verdadeiro positivo	71
Figura 8 – Representação da renovação do componente em uma inspeção antes de $M\Delta$, devido um falso positivo.....	72
Figura 9 – Representação da renovação do componente em uma inspeção depois de $M\Delta$, devido um falso positivo	73
Figura 10 – Representação da renovação do componente em uma falha antes de $M\Delta$, após verdadeiro negativo	74
Figura 11 – Representação da renovação do componente em uma falha depois de $M\Delta$, após verdadeiro negativo	75
Figura 12 – Representação da renovação do componente em uma falha antes de $M\Delta$, após falso negativo	76
Figura 13 – Representação da renovação do componente em uma falha depois de $M\Delta$, após falso negativo.....	77
Figura 14 – Representação da renovação do componente em uma oportunidade, após verdadeiro negativo, estando o componente defeituoso.....	79
Figura 15 – Representação da renovação do componente em uma oportunidade, após verdadeiro negativo, estando o componente bom	80
Figura 16 – Representação da renovação do componente em uma oportunidade, após falso negativo	81
Figura 17 – Representação da renovação do componente no limite de vida estabelecido para o	

componente, em estado defeituoso	82
Figura 18 – Combinação de M e K para o cálculo do custo e do tamanho do ciclo.....	84
Figura 19 – Gráfico da função $f_x(x)$	86
Figura 20 – Gráfico das funções $f_H(h)$ e $f_Z(z)$	87
Figura 21 – Gráfico das funções da taxa de custo por unidade de tempo e MTBOF para os Casos 1 e 2 do modelo de minimização do custo original.....	89
Figura 22 – Comportamento da taxa de custo por unidade de tempo e do MTBOF para o modelo de minimização do custo modificado	102
Figura 23 – Comportamento das funções da taxa de custo por unidade de tempo e MTBOF mediante melhoria da qualidade de manutenção da equipe Local	106
Figura 24 – Desenvolvimento do modelo de apoio à decisão multicritério	110
Figura 25 – Gráfico do critério Custo.....	114
Figura 26 – Gráfico do critério MTBOF	115
Figura 27 – Avaliação dos critérios mediante variação do parâmetro p	116
Figura 28 – Avaliação dos critérios mediante alteração do parâmetro β	117
Figura 29 – Comportamento dos critérios mediante alterações do parâmetro α	118
Figura 30 – Região de Conflito dos critérios Custo e MTBOF.....	119
Figura 31 – Avaliação das condições de independência	120
Figura 32 – Comportamento das funções custo e MTBOF para as alternativas da aplicação do modelo multicritério	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores utilizados para a aplicação numérica para o modelo de minimização do custo original	88
Tabela 2 – Resultados para o modelo de minimização do custo	89
Tabela 3 – Variações para os parâmetros de falso positivo e falso negativo para o modelo de minimização do custo	90
Tabela 4 – Variação no parâmetro de qualidade da manutenção para o modelo de minimização do custo	92
Tabela 5 – Variação em alguns parâmetros do modelo de minimização do custo	93
Tabela 6 – Valores utilizados para a aplicação numérica para o modelo de minimização do custo modificado	102
Tabela 7 – Variação para os parâmetros de falso positivo e falso negativo para o modelo de minimização do custo modificado	104
Tabela 8 – Variação de alguns parâmetros da aplicação numérica do modelo de minimização do custo modificado	104
Tabela 9 – Avaliação na melhoria da qualidade da manutenção e inspeção da equipe local	105
Tabela 10 – Valores utilizados para a aplicação numérica para o modelo multicritério	122
Tabela 11 – Resultado da aplicação do modelo multicritério	124

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 1..	70
Equação 2 - Custo de manutenção esperado para o Cenário 1	70
Equação 3 - Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 1	71
Equação 4 - Recurso de cálculo para o Cenário 1.....	71
Equação 5 - Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 2	72
Equação 6: Custo de manutenção esperado para o Cenário 2	72
Equação 7: Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 2.....	72
Equação 8: Recurso de cálculo para o Cenário 2	72
Equação 9: Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 3.....	73
Equação 10: Custo de manutenção esperado para o Cenário 3	72
Equação 11: Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 3.....	73
Equação 12: Recurso de cálculo para o Cenário 3	73
Equação 13: Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 4.....	74
Equação 14: Custo de manutenção esperado para o Cenário 4.....	73
Equação 15: Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 4.....	74
Equação 16: Recurso de cálculo para o Cenário 4.....	74
Equação 17: Probabilidade que o ciclo acabe com uma inspeção.....	74
Equação 18: Custo de manutenção esperado para renovação na inspeção.....	74
Equação 19: Tamanho esperado do ciclo para renovação na inspeção	74
Equação 20: Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 5.....	74
Equação 21: Custo de manutenção esperado para o Cenário 5	75
Equação 22: Recurso de cálculo para o Cenário 5.....	75
Equação 23: Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 5	75
Equação 24: Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 6.....	76
Equação 25: Custo de manutenção esperado para o Cenário 6.....	76
Equação 26: Recurso de cálculo para o Cenário 6.....	76
Equação 27: Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 6.....	76
Equação 28: Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 7.....	77
Equação 29: Custo de manutenção esperado para o Cenário 7	76
Equação 30: Recurso de cálculo para o Cenário 7.....	77
Equação 31: Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 7.....	77

Equação 32: Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 8.....	77
Equação 33: Custo de manutenção esperado para o Cenário 8	78
Equação 34: Recurso de cálculo para o Cenário 8.....	78
Equação 35: Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 8.....	78
Equação 36: Probabilidade que o ciclo acabe com uma falha.....	78
Equação 37: Custo de manutenção esperado para renovação na falha.....	78
Equação 38: Tamanho esperado do ciclo para renovação na falha	78
Equação 39: Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 9.....	79
Equação 40: Custo de manutenção esperado para o Cenário 9	79
Equação 41: Recurso de cálculo para o Cenário 9.....	79
Equação 42: Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 9.....	79
Equação 43: Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 10.....	80
Equação 44: Custo de manutenção esperado para o Cenário 10	80
Equação 45: Recurso de cálculo para o Cenário 10.....	80
Equação 46: Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 10.....	80
Equação 47: Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 11.....	81
Equação 48: Custo de manutenção esperado para o Cenário 11	81
Equação 49: Recurso de cálculo para o Cenário 11.....	81
Equação 50: Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 11.....	81
Equação 51: Probabilidade que o ciclo acabe com uma oportunidade.....	82
Equação 52: Custo de manutenção esperado para a renovação em oportunidade.....	82
Equação 53: Tamanho esperado do ciclo para renovação em oportunidade.....	82
Equação 54: Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 12.....	82
Equação 55: Custo de manutenção esperado para o Cenário 12	82
Equação 56: Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 12.....	82
Equação 57: Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário 13.....	83
Equação 58: Custo de manutenção esperado para o Cenário 13	83
Equação 59: Tamanho esperado do ciclo para o Cenário 13.....	83
Equação 60: Custo de manutenção esperado para o ciclo	83
Equação 61: Tamanho esperado para o ciclo	83
Equação 62: Taxa de Custo de manutenção por unidade de tempo	84
Equação 63: Tempo médio entre falhas operacionais	84
Equação 64: Função para a chegada do defeito.....	86

Equação 65:	Função para a chegada do defeito componente fraco	86
Equação 66:	Função para a chegada do defeito componente forte.....	86
Equação 67:	<i>Delay-time</i>	86
Equação 68:	Função para a chegada da oportunidade	87
Equação 69:	Recurso de cálculo para o Cenário A.....	95
Equação 70:	Custo de manutenção esperado para o Cenário A.....	95
Equação 71:	Recurso de cálculo para o Cenário B.....	95
Equação 72:	Custo de manutenção esperado para o Cenário B.....	95
Equação 73:	Recurso de cálculo para o Cenário C.....	96
Equação 74:	Custo de manutenção esperado para o Cenário C	96
Equação 75:	Tamanho esperado do ciclo para o Cenário C	96
Equação 76:	Recurso de cálculo para o Cenário D.....	96
Equação 77:	Custo de manutenção esperado para o Cenário D	96
Equação 78:	Tamanho esperado do ciclo para o Cenário D.....	96
Equação 79:	Recurso de cálculo para o Cenário E.....	97
Equação 80:	Custo de manutenção esperado para o Cenário E.....	97
Equação 81:	Tamanho esperado do ciclo para o Cenário E	97
Equação 82:	Recurso de cálculo para o Cenário F.....	97
Equação 83:	Custo de manutenção esperado para o Cenário F.....	97
Equação 84:	Tamanho esperado do ciclo para o Cenário F	97
Equação 85:	Recurso de cálculo para o Cenário G.....	98
Equação 86:	Custo de manutenção esperado para o Cenário G	98
Equação 87:	Tamanho esperado do ciclo para o Cenário G.....	98
Equação 88:	Recurso de cálculo para o Cenário H	99
Equação 89:	Custo de manutenção esperado para o Cenário H.	99
Equação 90:	Tamanho esperado do ciclo para o Cenário H.....	99
Equação 91:	Recurso de cálculo para o Cenário I.....	99
Equação 92:	Custo de manutenção esperado para o Cenário I.....	99
Equação 93:	Tamanho esperado do ciclo para o Cenário I	99
Equação 94:	Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário J.....	100
Equação 95:	Custo de manutenção esperado para o Cenário J	100
Equação 96:	Probabilidade que o ciclo acabe com o Cenário K.....	100
Equação 97:	Custo de manutenção esperado para o Cenário K	100

Equação 98: Taxa de Custo de manutenção por unidade de tempo para o modelo sem renovação no falso positivo.....	101
Equação 99: MTBOF para o modelo sem renovação no falso positivo	101
Equação 100: Cálculo do critério Custo	114
Equação 101: Cálculo do critério MTBOF.....	116
Equação 102: Função valor global.....	120
Equação 103: Função valor para o critério Custo	124
Equação 104: Função valor para o critério MTBOF	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ELECTRE	<i>Elimination et Choix Traduisant la Réalité</i>
EMQ	<i>Economic Manufacturing Quantity</i> – Quantidade Econômica de Manufatura
MACBETH	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Technique</i>
MAUT	<i>Multi-attribute Utility Theory</i> – Teoria da Utilidade multiatributo
MAVT	<i>Multi-attribute Value Theory</i> – Teoria de Valor Multiatributo
MC	Manutenção corretiva
MCDA	<i>Multiple criteria decision-aid</i>
MCDM	<i>Multiple criteria decision-making</i>
MP	Manutenção Preventiva
MPD	Manutenção Preditiva
MTBOF	<i>Mean Time Between Operational Failures</i> – Tempo médio entre falhas operacionais
MTTF	<i>Mean Time to Failures</i> – Tempo médio para a falha
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i> – Fabricante original do Equipamento
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation</i>
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i> – Manutenção Centrada na Confiabilidade
RMS's	<i>Reconfigurable Manufacturing Systems</i> – Sistemas de Manufatura Reconfiguráveis
SMARTER	<i>Simple Multi-Attribute Rating Technique using Exploiting Rankings</i>
SMARTS	<i>Simple Multi-Attribute Rating Technique using Swings</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i> – Manutenção produtiva total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	21
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.2	Objetivos Específicos	21
1.2	Aspectos metodológicos	22
1.3	Estrutura do trabalho	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1	Manutenção	24
2.1.1	Inspeção imperfeita	30
2.2	Definição de <i>delay-time</i>	31
2.3	Sistemas multicomponentes.....	33
2.4	Manutenção oportuna.....	34
2.5	Análise de Decisão Multicritério.....	36
2.6	Síntese conclusiva do capítulo	39
3	REVISÃO DA LITERATURA	40
3.1	Manutenção oportuna.....	40
3.2	Inspeção imperfeita.....	50
3.3	Síntese conclusiva do capítulo	59
4	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE MANUTENÇÃO BASEADO EM OPORTUNIDADE, CONSIDERANDO INSPEÇÃO IMPERFEITA.....	62
4.1	Descrição das características do sistema e da manutenção	62
4.2	Modelagem utilizando modelo simulado e modelo analítico.....	66
4.3	Modelagem da política de manutenção através de modelo analítico	68
4.4	Aplicação numérica do modelo de manutenção desenvolvido	84
4.5	Análise e discussão dos resultados para o modelo de minimização do custo.....	88
4.6	Proposição de modificação: não renovação do componente em falso positivo.....	93
4.6.1	Aplicação numérica do modelo modificado	101
4.7	Síntese conclusiva do capítulo	106
5	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO	108

5.1	Motivação para o desenvolvimento do modelo multicritério	108
5.2	Desenvolvimento do modelo multicritério	109
5.2.1	Descrição do problema.....	111
5.2.2	Estabelecer os fatores relevantes: critérios	113
5.2.3	Avaliar as alternativas do problema.....	118
5.2.4	Realizar a avaliação de preferência do decisor	119
5.2.5	Desenvolver a agregação multiatributo.....	120
5.2.6	Fazer análise de sensibilidade	121
5.2.7	Preparar a recomendação	121
5.3	Aplicação numérica do modelo multicritério	121
5.4	Síntese Conclusiva do Capítulo.....	126
6	CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS	128
6.1	Trabalhos Futuros.....	130
	REFERÊNCIAS	131

1 INTRODUÇÃO

Sistemas cada vez mais complexos, consumidores cada vez mais exigentes e alta competitividade entre empresas têm feito com que os processos que produzam bens e serviços sejam cada vez mais eficientes, permitindo que as necessidades dos clientes sejam atendidas da melhor forma. Para tanto, os sistemas precisam funcionar corretamente, evitando perdas por não atendimento de demanda, por quebras, por entrega de produtos com defeitos, não atendimento de serviços, entre outros. Sendo assim, as companhias buscaram reduzir seus custos e aumentarem seus lucros de maneira a atingir eficientemente os seus clientes, mantendo a sua competitividade no mercado (SAVIC; WALTERS; KNEZEVIC, 1995).

É sabido que alguns sistemas mantêm seu funcionamento normal por certo período de tempo, podendo ocorrer degradação pelo uso ou pela idade, o que diminui a capacidade de entregar os serviços ou produtos para os quais foram projetados (SCARF; CAVALCANTE, 2012). Todavia, quando um sistema falha, principalmente em se tratando de sistemas complexos, as consequências podem ser bastante expressivas, podendo resultar em grandes perdas econômicas, afetar seres humanos, ocasionar danos ambientais, e proporcionar perda da imagem da empresa. Isso pode ocorrer devido a, por exemplo, um problema numa aeronave em voo, uma falha em uma usina hidrelétrica, ou colapso de uma ponte, os quais podem apresentar uma série de consequências catastróficas.

A fim de evitar esse tipo de problema, a confiabilidade dos sistemas pode ser avaliada e, então, a melhor forma de manter esta confiabilidade a um nível adequado precisa ser estipulada (WANG, 2012). Dessa forma, modelos de manutenção que levam em conta a confiabilidade dos sistemas têm sido investigados na literatura, com maior ênfase em modelos matemáticos a partir dos anos 1960 (NOWAKOWSKI; WERBIŃKA, 2009).

Além da confiabilidade dos sistemas, os modelos de manutenção costumam avaliar os custos envolvidos com as ações que serão tomadas para manter o sistema em funcionamento ou então para restaurá-lo. De acordo com Shi e Zeng (2016), as atividades de manutenção desempenham um papel importante na melhoria da disponibilidade, confiabilidade, segurança e na redução dos custos do ciclo de vida. Nesse sentido, desenvolver e manter programas de manutenção nos sistemas é um fator importante para atender aos objetivos organizacionais das empresas, para se conservarem competitivas no mercado.

Dessa maneira, maior evidência para manutenção de diversos sistemas tem proporcionado o aumento de interesse pelo desenvolvimento e implementação de estratégias de

manutenção otimizadas, objetivando melhorar a confiabilidade e os custos de manutenção, diminuindo a ocorrência de falhas de sistemas sujeitos à deterioração (WANG, 2002). A manutenção preventiva tem sido uma delas, como forma efetiva de reduzir o número de ocorrência de falhas e, conseqüentemente, o tempo que o sistema permanece parado (DEKKER; SMEITINK, 1991).

Assim, a gestão da manutenção de sistemas pode ser considerada como a adoção de uma variedade de estratégias, a exemplo da manutenção preventiva, manutenção corretiva, manutenção preditiva, cujo objetivo é, assegurar o bom funcionamento desses sistemas (DE ALMEIDA *et al.*, 2015; LEE; CHA, 2016). Seus principais objetivos estão relacionados ao desenvolvimento de políticas de manutenção para buscar a redução dos custos, aumento da confiabilidade e da disponibilidade do sistema (BERRADE *et al.*, 2013; CAVALCANTE; LOPES; SCARF, 2018).

Um ponto a ser avaliado na definição de uma política de manutenção está relacionado ao tipo de sistema que se está analisando. Um sistema multicomponente, por exemplo, é constituído por diversos componentes, os quais podem ou não ter algum tipo de dependência (estocástica, econômica ou estrutural). Para esse tipo de sistema, em especial, pode-se utilizar a política de manutenção oportuna, pois a parada de algum componente pertencente ao sistema pode proporcionar uma janela de tempo para executar manutenção preventiva nos demais componentes (YANG *et al.*, 2018). As paradas dos componentes podem ser produzidas por diversos motivos, tais como parada para manutenção, problemas com a demanda, falta de produto para ser processado, falta de mão-de-obra, entre outros.

Considerando que a manutenção não somente busca a melhoria da performance dos sistemas, mas também a diminuição das interrupções no funcionamento deles, a utilização de manutenção oportuna pode ser uma boa alternativa para buscar uma boa relação entre as duas circunstâncias (LIN *et al.*, 2019). Essas interrupções são então chamadas de oportunidades, e suas chegadas costumam ser modeladas através de distribuições de probabilidades, assim, as chegadas de oportunidade podem ser incorporadas aos modelos de manutenção. Thomas, Levrat e Iung (2008) afirmaram que oportunidades surgem em abundância nos sistemas, porém se elas não forem modeladas de forma coerente não serão aproveitadas pelos gestores no estabelecimento da política de manutenção.

A partir de comparações realizadas com o trabalho publicado por Marsaro e Cavalcante (2017), foi possível identificar que os modelos desenvolvidos nessa tese podem produzir melhores resultados se modelados analiticamente ao invés de utilizar um modelo simulado.

Ademais, tal decisão pode ser embasada pelas diferenças nas características dos sistemas a serem modelados nessa tese e no trabalho dos referidos autores, conforme será explanado no trabalho.

Dessa forma, como contribuição para a busca de proporcionar embasamento para a tomada de decisão mais assertiva pelos gestores de manutenção, a presente tese apresenta o desenvolvimento de modelos de manutenção oportuna utilizando inspeção imperfeita e múltiplos critérios. Neste trabalho o modelo proposto por Cavalcante, Lopes e Scarf (2018) foi remodelado. Os autores propuseram um modelo de manutenção oportuna considerando a substituição em oportunidades, principalmente quando tal substituição antecipa uma substituição programada com um menor custo, porém não consideraram aspectos relacionados à qualidade das inspeções.

De acordo com Albertin *et al.* (2018) a qualidade da manutenção tem se tornado um aspecto relevante na definição de políticas de manutenção, que podem ser afetadas pela qualidade da equipe de manutenção que executa as ações, assim como pela qualidade das ferramentas utilizadas. Nesse sentido Berrade, Cavalcante e Scarf (2012) apresentaram avaliação da qualidade da manutenção através da consideração de erros no processo de inspeção de um componente para um sistema de proteção. Tal avaliação consiste em considerar probabilidade de ocorrência de falso positivo e falso negativo na inspeção.

Um falso positivo acontece quando, em uma inspeção, o componente analisado se encontra em estado de funcionamento bom (sem defeito), porém o resultado da inspeção diz que ele esteja defeituoso, enquanto que no falso negativo o componente está em estado defeituoso, mas o defeito não é identificado. Essa situação foi modelada por alguns autores, tais como Okumura, Jardini e Yamashina (1996); Berrade, Scarf e Cavalcante (2015); Driessen, Peng e Van Houtum (2017), dentre outros.

O que será apresentado nesse trabalho é a avaliação de como a qualidade da manutenção pode afetar na definição de uma política de manutenção. Pode-se observar que o falso positivo ocasiona a substituição do componente precocemente, pois esse se encontra em estado bom e acaba sendo renovado antes de uma verdadeira necessidade, ao passo que o falso negativo pode aumentar a possibilidade de ocorrência de uma falha entre as ações de inspeções, deixando o componente mais vulnerável.

Sendo assim, primeiramente essa tese apresenta o desenvolvimento de um modelo de manutenção analítico para um componente que está sujeito à degradação ao longo do tempo, cujo processo de falhas é modelado através do conceito de *delay-time*. Tal componente é

inspecionado periodicamente ao longo do tempo, e as ações de inspeção estão sujeitas à erros, conforme mencionado anteriormente. Esse modelo é otimizado através da minimização da taxa de custo de manutenção por unidade de tempo em que se pretende identificar os melhores valores para as variáveis de decisão, as quais são: intervalo de tempo entre as inspeções, número de inspeções para se considerar a chegada de oportunidades e número máximo de inspeções em um ciclo. Esse modelo também é utilizado para calcular o Intervalo Médio entre Falhas Operacionais (*Mean Time Between Operational Failure* – MTBOF).

Como forma de fornecer *insights* para os gestores de manutenção foi considerada para a aplicação numérica do modelo de minimização do custo uma avaliação de diferentes equipes para executar as ações de manutenção do componente analisado, as quais são uma equipe local e uma equipe especializada de manutenção. A OEM (*Original Equipment Manufacturer* – Fabricante do Equipamento Original) é uma equipe especializada, cuja contratação geralmente está relacionada a custos de manutenção mais caros, porém com qualidade elevada das suas ações, principalmente quando comparados à equipe local. Sendo assim, foram comparados os resultados do modelo mediante a utilização da equipe local ou da OEM.

Uma terceira opção para realizar as ações de manutenção está na utilização de uma equipe híbrida, em que as ações de inspeção são realizadas pela equipe local, enquanto que as ações de substituição do componente (tanto preventivamente quanto corretivamente) são realizadas pela OEM. Esse cenário embasou uma proposta de modificação para o modelo de minimização da taxa de custo de manutenção, pois havendo a detecção de um defeito no componente por parte da equipe local, a OEM é chamada para atestar a degradação do componente. Assim, o componente somente será substituído na inspeção, se ele estiver defeituoso.

Além disso, observou-se que, em alguns casos, não basta levar em consideração apenas as características do sistema, mas também a percepção dos tomadores de decisão quanto ao problema. Todavia, a experiência dos gestores pode ser de grande valia para a programação de ações de inspeção. Ademais, considerar apenas um objetivo pode contradizer com as necessidades desses tomadores de decisão, que podem necessitar levar em conta, além do custo, a disponibilidade, segurança, meio ambiente, riscos operacionais, imagem do negócio, reputação frente aos consumidores e concorrentes, entre outros (Van HORENBEEK; PINTELON; MUCHIRI, 2010).

Sendo assim, além dos modelos analíticos de minimização do custo, este trabalho se propõe a desenvolver um modelo de apoio à decisão multicritério que avalie ao mesmo tempo os critérios Taxa de Custo por unidade de tempo e o MTBOF (Tempo médio entre falhas

operacionais – *Mean Time Between Operational Failure*) por intermédio da Teoria de Valor Multiatributo (MAVT – *Multi-attribute Value Theory*). O objetivo do desenvolvimento desse modelo é verificar a influência que a visão de um tomador de decisão pode ter sobre os resultados do modelo, e como a consideração de múltiplos objetivos pode influenciar na tomada de decisão, possibilitando avaliar ao mesmo tempo esses dois critérios, já que cada uma das aplicações propostas leva a um melhor resultado em um dos critérios.

1.1 Objetivos

A definição dos objetivos tem como finalidade apresentar onde se pretende chegar com o desenvolvimento do presente trabalho, através da apresentação do objetivo geral e dos objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver modelos de manutenção analíticos e de múltiplos critérios, baseados na manutenção oportuna e que levem em consideração a possibilidade de erros na inspeção.

1.1.2 Objetivos Específicos

Visando atender o objetivo geral apresentado anteriormente, a presente tese tem como objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo analítico para buscar a minimização da taxa de custo de manutenção por unidade de tempo e avaliar o tempo médio entre falhas operacionais;
- Propor modificação para o modelo, considerando que o componente não será substituído na ocorrência de falso positivo;
- Realizar aplicação numérica para os modelos analíticos de minimização da taxa de custo;
- Avaliar o impacto no resultado ótimo do modelo de minimização de taxa de custo de manutenção;
- Desenvolver um modelo de apoio à decisão multicritério, baseado em MAVT;
- Discutir como o comportamento do tomador de decisão e a avaliação de múltiplos critérios podem afetar os resultados.

1.2 Aspectos metodológicos

A presente tese foi baseada em alguns aspectos metodológicos para que ela fosse desenvolvida. Um referencial teórico foi produzido baseado em autores das áreas de: manutenção, definição de *delay-time*, manutenção oportuna e Análise de decisão multicritério. A revisão da literatura foi desenvolvida de forma cronológica analisando os trabalhos na área de manutenção oportuna e inspeção imperfeita.

Posteriormente, passa-se para o desenvolvimento dos modelos de manutenção. Tal desenvolvimento pode ser baseado na estrutura para o desenvolvimento de modelos de pesquisa operacional, já que eles se tratam de modelos de otimização. De acordo com Hillier e Liberman (2015), o processo de desenvolvimento de um modelo de Pesquisa Operacional passa por seis etapas, a saber: Definição do problema e coleta de dados; Formulação do modelo matemático; Derivação de soluções do modelo; Teste do modelo; Preparação para aplicação do modelo; Implementação.

O desenvolvimento do problema de pesquisa teve como base o fato de existir uma lacuna de publicações que considerem ao mesmo tempo características de modelos de manutenção oportuna e os de inspeção imperfeita. Considerou-se, as características do sistema como *insight* para o desenvolvimento dos modelos analíticos.

Foram construídos cenários que representam de forma exaustiva as possibilidades de renovação do componente analisado, para que, como forma de validação do modelo, a soma da probabilidade de ocorrência dos cenários seja igual a um. Após o modelo validado, utilizou-se de aplicação numérica para análise do comportamento dos parâmetros para o modelo.

O modelo de apoio à decisão multicritério foi desenvolvido embasado nos procedimentos clássicos para essa área, propostos por autores tais como Keeney e Raiffa (1976), De Almeida (2013) e De Almeida *et al.* (2015). Como base para os cálculos foi utilizado o modelo analítico de minimização da taxa de custo de manutenção por unidade de tempo original, desenvolvido nessa tese. Pode-se citar alguns autores que trabalharam com essa mesma metodologia em gestão da manutenção, tais como: Ferreira, De Almeida e Cavalcante (2009), Cavalcante e Lopes (2014, 2015), Alberti, *et al.* (2018), entre outros.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução mostrando a motivação, justificativa e relevância do trabalho desenvolvido, assim

como os objetivos geral e específicos que norteiam a pesquisa. Em seguida, o Capítulo 2 traz o embasamento teórico para a pesquisa, mostrando os principais conceitos na área de manutenção, *delay-time*, política de manutenção oportuna e análise de decisão multicritério. O capítulo seguinte, Capítulo 3, trata da revisão da literatura do trabalho, em que as principais pesquisas já publicadas nas áreas de manutenção oportuna e de inspeção imperfeita são apresentadas.

Posteriormente, o Capítulo 4 aborda o desenvolvimento do modelo de manutenção, baseado em manutenção oportuna e inspeção imperfeita, que tem por finalidade encontrar os valores para as variáveis de decisão que minimizam o custo de manutenção por unidade de tempo esperado e avalia o tempo médio entre falhas operacionais. Neste capítulo é apresentada a aplicação numérica para esse modelo e, em seguida, uma proposta de modificação é mostrada, em que análises comparativas são feitas.

O Capítulo 5 apresenta o desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão multicritério que tem como base o modelo analítico desenvolvido no Capítulo 4. Ele apresenta os passos para o desenvolvimento do modelo baseado em MAVT e uma aplicação numérica para ele é realizada, o que promove alguns *insights* para comparações entre os resultados no modelo analítico e o de apoio à decisão multicritério.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões, mostrando as limitações e os aspectos positivos resultantes do trabalho, além da proposição para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem como finalidade apresentar o embasamento teórico no qual esse estudo está fundamentado, por meio do uso de definições de autores renomados no assunto apresentado. Serão expostos os conceitos de manutenção, definição de *delay-time*, manutenção oportuna e análise de decisão multicritério.

2.1 Manutenção

De acordo com Dekker (1996), os primeiros estudos científicos na área de manutenção ocorreram por volta das décadas de 1950 e 1960, quando a manutenção preventiva era considerada uma maneira de reduzir falhas e o tempo de parada não planejado. Os primeiros modelos de otimização de pesquisa operacional na área de manutenção surgiram nos anos de 1960, enquanto que os modelos de monitoramento de condição, nos anos de 1970, tentando prever falhas através da análise do estado dos equipamentos. Nos anos 1980, a utilização de computadores facilitou o desenvolvimento e surgimento de novos modelos de manutenção, os quais se desenvolvem até os dias atuais.

Entende-se por manutenção todas as ações realizadas em sistemas que possam contribuir para manter em funcionamento ou restaurar os ativos de uma companhia (WANG, 2012). Ela atua paralelamente ao setor de produção de bens ou de serviços tendo grande impacto na capacidade de produção de bens e serviços, bem como na qualidade do fornecimento deles, merecendo devida atenção e sendo alvo de melhoria contínua (SAVIC; WALTERS; KNEZEVIC, 1995). A manutenção tem recebido maior ênfase principalmente quando as empresas entendem que ela pode contribuir para o aumento dos lucros, de maneira a assegurar que os equipamentos possam ser reparados, substituídos, e modificados de acordo com as necessidades da companhia (AB-SAMAT; KAMARUDDIN, 2014).

Nesse sentido, conforme Pham e Wang (1996), corroborado Pintelon e Parodi-Herz (2008), pode-se dizer que a manutenção é um conjunto de ações, planejadas ou não, necessárias para manter as condições de operações de acordo com a forma desejada ou então para restaurar o sistema para essa condição.

Então, a manutenção tem como objetivo garantir o funcionamento do sistema, mantendo a disponibilidade, eficiência e qualidade dos produtos, prolongar a vida do sistema, garantir segurança e o bem-estar dos humanos (DEKKER, 1996). A depender do tipo de organização

que se está analisando e as possíveis consequências das falhas, alguns desses objetivos tornam-se mais relevantes. Grandes indústrias, por exemplo, tendem a buscar maior disponibilidade do sistema tentando ajustar da melhor forma os custos, enquanto que a segurança passa a ser o foco principal quando se tem consequências catastróficas provenientes de falhas, como acidentes envolvendo aviões, indústria química ou nuclear.

Como dito, a depender do tipo de sistema a ser analisado, o objetivo da manutenção pode ser diferenciado. Porém, para muitos dos setores, esses objetivos podem ser sumarizados, de acordo com De Almeida *et al.* (2015), em:

- Prolongar a vida útil dos equipamentos/componentes;
- Proporcionar disponibilidade em níveis satisfatórios;
- Assegurar a prontidão operacional do sistema;
- Proteger as pessoas que utilizam o sistema ou que são afetadas por ele.

Dessa forma, Wang e Pham (2006) afirmam que a manutenção em sistemas sujeitos à deterioração, devido ao uso e à idade, é necessária para que esta possa aumentar a confiabilidade desses sistemas. O aumento da importância dessa área tem valorizado o desenvolvimento e a implementação de estratégias para melhorar a confiabilidade dos sistemas, buscando evitar a ocorrência de falhas e reduzir os custos de manutenção desses sistemas.

Uma forma de tentar assegurar o que foi mencionado acima é através do monitoramento da condição dos equipamentos, por meio de inspeções periódicas ou não, no sistema. Quanto a isso, é possível verificar que um intervalo muito pequeno entre inspeções pode produzir custos e *downtime* muito elevados, ao passo que, se esse intervalo for muito grande podem ocorrer perdas e quebras do sistema, resultando em uma manutenção dispendiosa e, possivelmente, consequências graves advindas das falhas. Nesse sentido, o intervalo de tempo entre inspeções foi descrito por Carr e Christer (2003) como sendo uma variável de decisão chave para o desenvolvimento de um bom modelo de manutenção.

Ações de manutenção realizadas adequadamente e em tempos apropriados são necessárias para reduzir o número de incidentes em uma companhia, aumentando a confiabilidade nas máquinas e equipamentos, além de proporcionar ganhos com melhoria da qualidade e disponibilidade de toda a organização (WANG, 2012). De acordo com Das e Sarmah (2010), a manutenção possui especial relevância em sistemas em que paradas inesperadas geram custos extremamente altos, o que impulsiona o desenvolvimento de modelos de gestão da manutenção para casos específicos dessas indústrias.

Sendo assim, o Gerenciamento da Manutenção desempenha um papel crítico na prevenção dos sistemas tendo em conta a deterioração e ocorrência de falhas. De acordo com Wang e Hwang (2004), o Gerenciamento da Manutenção pode ser definido como a combinação de técnicas de manutenção com ações administrativas para restaurar ou manter o sistema em funcionamento. Para eles, há três objetivos principais para o Gerenciamento da Manutenção:

1. Assegurar a função do sistema (disponibilidade, eficiência e qualidade dos produtos);
2. Assegurar a vida do sistema, garantindo a segurança; e
3. Garantir o bem-estar humano.

Dois aspectos são considerados como típicos para o gerenciamento da manutenção, conforme afirma Dekker (1996). Primeiro, é que os equipamentos possuem um processo estocástico de degradação e de surgimento de falhas, o que precisa ser modelado e analisado, pois pode produzir perdas significativas para a empresa caso uma parada ocorra. E, em segundo lugar, a manutenção pode ser realizada de diferentes formas, as quais podem incidir em altos custos, mas nem sempre os seus benefícios são aparentes. Dessa maneira, cabe à equipe de gerenciamento de manutenção executar um planejamento que leve em conta todos os fatores, incluindo custos e benefícios.

Quando se trata dos valores investidos para realizar manutenção, Dekker e Scarf (1998) comentam que o aumento dos gastos se deu principalmente por três motivos: 1. O crescimento no inventário de capital, de maneira que todas as estruturas artificiais construídas necessitem de manutenção, tais como estradas, construções, pontes; 2. Os requerimentos necessários para o funcionamento dos sistemas têm aumentado, como por exemplo a utilização da filosofia do *just-in-time*; e 3. A terceirização da manutenção, em que empresas especialistas em realizar a manutenção são contratadas, tendo maior foco nos problemas fundamentais de manutenção.

Para tanto, uma política de manutenção precisa ser definida. Para Junca e Sanchez-Silva (2013) política de manutenção pode ser definida como um conjunto de ações direcionadas para manter o sistema operando em um nível de serviço pré-estabelecido. Enquanto que De Almeida *et al.* (2015) adicionam que ela é desenvolvida para implementar o plano de manutenção da empresa, definindo-a como a agregação das características do sistema e as atividades de manutenção, incluindo os objetivos dos tomadores de decisão.

Políticas de manutenção ótimas têm sido desenvolvidas ao longo de vários anos por meio da utilização de diferentes técnicas para proporcionar ao sistema melhor confiabilidade, maior disponibilidade e buscando a minimização dos custos de manutenção (PHAM; WANG, 1996) (WU; CLEMENTS-CROOME, 2005). Então, para o desenvolvimento da política de

manutenção é necessário avaliar quais os tipos de ações que serão tomadas, as quais podem ser classificadas em Manutenção Preventiva (MP), Manutenção Corretiva (MC) ou Manutenção Preditiva (MPD), que serão definidas a seguir.

Entende-se por Manutenção Preventiva (MP) todas as ações planejadas de manutenção realizadas em épocas específicas do tempo, objetivando manter os equipamentos ou itens em condições de trabalho por intermédio de processos de verificação e condicionamento (DHILLON; LIU, 2006). Conforme afirmam Das e Sarmah (2010), realizar o reparo ou a substituição de equipamentos ou itens antes de eles falharem é a mais importante atividade dos engenheiros de manutenção quando realizam MP, que deve ser feita cuidadosamente, uma vez que ações de MP frequentes podem aumentar o custo de manutenção.

Ela também pode ser abordada através da manutenção baseada no tempo (*time-based maintenance*), que contrasta com a manutenção baseada em condições (*condition-based maintenance*) (WANG, 2012). Os defeitos e as quebras são monitorados e guardados em uma base dados, o que servirá de base para gerar informação para realizar MP, tais como Tempo médio entre falhas (*Mean time to failure*) e Tempo médio para o reparo (*Mean time to repair*) (LEE e WANG, 2008).

Esse tipo de manutenção é considerado uma estratégia muito eficiente para reduzir o número de falhas que ocorrem nos sistemas, reduzindo também o custo geral de manutenção. Porém, se as ações de MP forem realizadas seguidamente, o sistema pode permanecer em um estado inoperante por muito tempo, aumentando a sua função de perda. Dessa maneira, para Okogbaa *et al.* (2008) grandes esforços para o planejamento do intervalo de tempo para realizar as ações de manutenção são necessários.

Ainda sobre Manutenção Preventiva, Zhang e Zeng (2015) afirmam ser essa uma estratégia para prevenir a deterioração e falhas do sistema enquanto esse está em operação, principalmente quando um evento desse tipo pode ser perigoso e caro. No entanto, é necessário balancear as atividades e o custo que elas podem incorrer, pois realizar muitas ações de MP podem ser caras e necessitar de maior tempo. Já para Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016) as ações de MP são realizadas de acordo com uma certa programação que tem como critério o tempo, uso ou condição, para que a probabilidade de falhas ou a degradação de um item seja reduzida. Para eles os objetivos das ações de MP são: Prevenir falha; Detectar o início de falhas; e Buscar falhar ocultas.

Em relação à Manutenção Corretiva (MC), pode-se dizer que se trata de ações de manutenção não planejadas para retornar um equipamento ou item para um estado anterior à

falha, realizada devido a parada do sistema ou por deficiências no processo percebidas pela equipe de manutenção (DHILLON; LIU, 2006). Enquanto que para Pham e Wang (1996) MC são todas as ações tomadas como um resultado de uma falha no sistema, de maneira a restaurar um componente para uma condição específica.

Os autores Junca e Sanchez-Silva (2013) afirmam que o custo para se realizar MC é geralmente mais alto que para realizar MP. Segundo eles, isso acontece porque pode ser incluso no custo da ação corretiva, em adição ao custo do reparo/substituição, os custos por tempo que o sistema permanece inativo.

A Manutenção Preditiva (MPD) trata do uso de técnicas modernas e métodos de avaliação do estado dos equipamentos e itens para diagnosticar a condição deles durante a operação, tais como equipamentos mais sofisticados nas linhas de produção que meçam vibração e temperatura (DHILLON; LIU, 2006). Enquanto que para Carnero (2006), MPD é uma política de manutenção em que alguns parâmetros relacionados ao sistema em operação são selecionados para serem detectados, medidos e gravados, de forma intermitente ou contínua, para que sejam analisados e que forneçam suporte para as decisões relacionadas à manutenção do sistema. Por sua vez, Garg e Deshmukh (2006), MPD consiste na decisão de quando se deve manter ou não um sistema, de acordo com o seu estado.

A inspeção visual é a técnica mais antiga para realizar a MPD que é ainda amplamente utilizada. Além dela, outras técnicas e/ou métodos automatizados podem ser utilizados, como processamento de sinais baseados em padrões utilizando redes neurais, lógica *fuzzy*, dados empíricos e modelagem física. Partindo de medidas realizadas através de sensoriamento humano com os olhos, narizes e ouvidos, para sensores que detectam o início de degradações ou falhas nos equipamentos. E a integração desses com as técnicas de Manutenção Preditiva podem evitar substituições desnecessárias, diminuir custos e melhorar a segurança, disponibilidade e eficiência dos processos (HASHEMIAN; BEAN, 2011).

A utilização de Manutenção Preditiva pode fornecer ganhos em aumentar a disponibilidade, segurança, qualidade, produtividade em componentes/equipamentos, além de diminuir custos de manutenção e insegurança. Bana e Costa, Carnero e Oliveira (2012) afirmam que a sua utilização se faz particularmente necessária em sistemas que possuem alta necessidade de segurança, como plantas nucleares, principalmente quando a taxa de utilização dos equipamentos é muito alta.

As vantagens na utilização de Manutenção Preditiva, de acordo com Carnero (2006), podem ser sumarizadas em: 1. Aumento da disponibilidade dos componentes industriais; 2.

Proporciona melhor agendamento das ações de manutenção; e 3. Controle exclusivo dos componentes que apresentam início de mau funcionamento.

A escolha do tipo de manutenção a ser realizada em um item em particular, depende da gravidade das consequências provenientes de uma falha deste item, é o que afirma Saranga (2004). Segundo a autora, aqueles itens cuja consequência é insignificante não são alvo de ações preventivas e sim sofrem correção quando falharem, ao passo que para aqueles que a falha pode resultar em perdas econômicas e/ou de segurança, a manutenção preventiva deve ser realizada com o intuito de prevenir falhas.

Além disso, de acordo com Pham e Wang (1996) e Wang e Pham (2006), a manutenção pode ainda ser classificada conforme a maneira pela qual a recuperação dos componentes é executada na ação de manutenção, como segue:

- Reparo perfeito ou manutenção perfeita: são as ações de manutenção que restauram o componente para o estado de “tão bom quanto novo” (*as good as new*), ou seja, um componente que tenha sofrido uma ação de manutenção perfeita tem a sua distribuição de vida e a função de taxa de falha como um novo;
- Reparo mínimo ou manutenção mínima: a ação de manutenção restaura a taxa de falha do componente para a que existia antes da falha, chamado de “tão ruim quanto velho” (*as bad as old*);
- Reparo imperfeito ou manutenção imperfeita: a ação de manutenção não restaura o estado do componente para “tão bom quanto novo”, mas deixa-o mais novo do que quando a ação foi tomada. Usualmente, considera-se que esse tipo de manutenção restaura o sistema para alguma condição entre “tão bom quanto novo” e “tão ruim quanto velho”;
- Pior reparo ou manutenção: ações que fazem com que o equipamento tenha sua taxa de falha ou idade aumentada, porém ele não para de funcionar.

Por se tratar de uma área em que pode haver muitos custos e perdas relacionadas a um acontecimento de uma falha, surge a ideia de Otimização da manutenção. De acordo com Dekker (1996) ela se trata de um modelo matemático que busca um balanço ótimo entre os custos e os benefícios de se realizar a manutenção. Os autores Ab-Samat e Kamaruddin (2014) acrescentam que a otimização busca reduzir os custos de manutenção ao máximo possível sem sacrificar o tempo de vida útil do equipamento e a confiabilidade do sistema.

Conforme Sharma, Yadava e Deshmukh (2011), os modelos de otimização da manutenção podem ser tanto qualitativos quanto quantitativos. Primeiramente os modelos eram baseados na utilização de técnicas como Manutenção Produtiva Total (TPM – do inglês *Total Productive Maintenance*), Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM – do inglês *Reliability Centered Maintenance*) e, posteriormente, incorporando modelos determinísticos ou estocásticos, como decisão de Markov e modelos Bayesianos.

Nesse sentido, Garg e Deshmukh (2006) afirmam que os modelos de otimização da manutenção tratam de quatro aspectos:

1. Descrição de um sistema, sua função e importância;
2. Modelagem da deterioração no tempo desse sistema, e as possíveis consequências;
3. Descrição das informações disponíveis do sistema e das ações sujeitas à gestão; e
4. Possuem uma função objetivo e descrevem uma técnica de otimização para encontrar a melhor resposta.

2.1.1 Inspeção imperfeita

A manutenção imperfeita pode receber diversos significados, dentre eles, considerar que, durante a realização da manutenção, as ações não sejam perfeitas, podendo ocorrer erros. Também pode-se considerar que ocorram erros na inspeção, como por exemplo na percepção de que há defeito no sistema, ou mesmo ocorrer a indução de defeito em uma ação de inspeção, conforme explanado por Alberti *et al.* (2018).

A inspeção imperfeita está relacionada a erros de julgamentos ocorridos nas ações de inspeção, os quais estão relacionados a algumas probabilidades. Conforme apresentaram Berrade, Scarf e Cavalcante (2015) um sistema será restaurado quando em uma inspeção um defeito ou uma falha foi detectado de maneira correta, ocorrendo um verdadeiro positivo (*true positive*) ou através de um falso positivo (*false positive*), no qual o sistema está em boas condições, mas a inspeção identificou um defeito. Também pode acontecer que em uma inspeção nada seja feito, por não ter identificado um defeito no sistema de forma correta (*true negative*), ou por um falso negativo (*false negative*), quando o sistema não está operando em suas condições normais, e isso não foi detectado. Para cada um desses possíveis eventos nas inspeções está associada uma determinada probabilidade.

2.2 Definição de *delay-time*

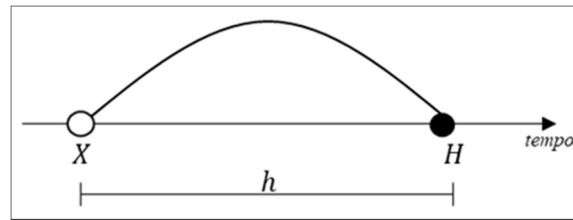
Modelos de manutenção baseados em *delay-time* têm sido desenvolvidos como uma estrutura para determinar estratégias de monitoramento para sistemas, no intuito de detectar defeitos e falhas (AVEN, 2009; AVEN; CASTRO, 2009). Para Christer (1999) *delay-time* é um conceito que torna a análise matemática pragmática, que é facilmente utilizada por engenheiros para modelar problemas de decisão em manutenção, difundindo e facilitando sua utilização.

Dessa maneira, *delay-time* foi definido por Christer e Waller (1984) como sendo um intervalo de tempo desde quando uma falha é identificada pela primeira vez até quando sua correção não pode ser mais adiada devido às consequências que podem ser geradas. Esse conceito está relacionado à existência de um processo de falhas em dois estágios: o primeiro estágio refere-se ao funcionamento normal do sistema, até o ponto em que um defeito possa ser identificado, enquanto que o segundo se trata do ponto de identificação do defeito até a falha (WANG, 2008).

As primeiras definições de *delay-time* foram introduzidas por intermédio do artigo de grande divulgação em 1982 por Christer intitulado “*Modelling Inspection Policies for building Maintenance*”. O que motivou o desenvolvimento da sua pesquisa foram dois pontos específicos, primeiro que um defeito encontrado em tempo suficientemente antes de se tornar perceptível pelo usuário tende a ter um custo de reparo menor e, segundo, que os esforços das equipes de manutenção podem ser agrupados e alocadas em momentos específicos, o que torna a correção dos defeitos mais eficiente.

Uma definição mais geral para o modelo de manutenção baseada em *delay-time* pode ser verificada na Figura 1, em que x representa o acontecimento de um defeito em um componente, h representa o intervalo de tempo entre o momento em que X ocorre até que a falha ocorra, no momento H . Sendo que esse tempo h pode ser representado por uma distribuição de probabilidade $H(h)$.

Figura 1 – Esquema representativo da definição de *delay-time*



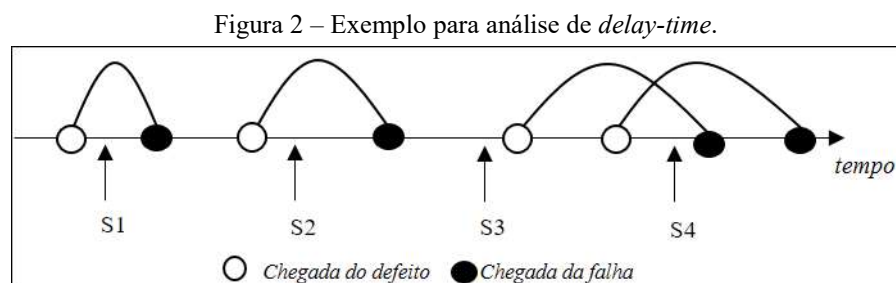
Fonte: A Autora (2019).

O *delay-time* pode conter características relacionadas ao tipo de sistema que se está analisando, o tipo de defeito, a natureza da inspeção assim como a pessoa responsável por realizar as inspeções. Sendo assim, a política de manutenção baseada em *delay-time* relaciona o intervalo entre inspeções e a quantidade de falhas que podem ser capturadas nesse intervalo, é o que afirmam Christer (1999) e Wang (2012).

Porém, o *delay-time* não é constante em todas as falhas e sim uma variável aleatória que comumente é caracterizada segundo uma função densidade de probabilidade $f(h)$. Geralmente não é possível obter esse tempo apenas através de observação direta, sendo necessário estimá-lo em casos específicos (CHRISTER; REDMOND, 1992).

De acordo com Aven e Castro (2009), o conceito básico de *delay-time* foi desenvolvido para analisar sistemas cujo tempo de inspeção seja periódico a cada T unidades de tempo. Ou seja, se uma inspeção é realizada dentro do intervalo de *delay-time* um defeito será identificado e removido do sistema, caso a inspeção seja perfeita.

Para apresentar as vantagens da utilização da política de *delay-time* os autores Jones, Jenkinson e Wang (2009) propuseram analisar a Figura 2 a seguir. Nela é possível identificar a ocorrência de defeitos randomicamente ao longo do tempo, e os marcos no tempo foram identificados com a letra S.



Fonte: Adaptado de Jones, Jenkinson e Wang (2009).

É possível observar na Figura 2 que, considerando que os tempos em que as inspeções são realizadas S1, S2, S3 e S4 são dados em semanas, dos quatro defeitos que chegaram ao

longo do tempo, todos foram identificados, antes de se tornarem uma falha e corrigidos. Porém, em uma das inspeções (S3), nenhum defeito foi encontrado, significando apenas custo de realizar inspeção nesse momento. Se, ao invés de a inspeção ser realizada semanalmente ela fosse efetuada mensalmente, em S4, dois defeitos seriam identificados, nesse caso os custos com inspeção seriam menores, porém as consequências da ocorrência de falhas seriam sentidas pelo sistema.

Contribuem para que as inspeções demandem diferentes recursos: o tempo necessário para realizar uma inspeção, o tempo de produção que foi perdido devido à inspeção, o custo de horas manuais desperdiçadas diretamente da tarefa de inspeção e, indiretamente, o custo de operadores de equipamentos que não conseguiram realizar seus trabalhos. Portanto, é vital ter o equilíbrio certo entre quantidade de inspeção e a possibilidade de ocorrência de falha no equipamento, corroborando para a utilização da política de *delay-time* (JONES; JENKINSON, WANG, 2009).

2.3 Sistemas multicomponentes

Modelos de manutenção para sistema multicomponentes são assim chamados por considerarem várias máquinas ou equipamentos, ou ainda pedaços de equipamentos, que podem ou não ser dependentes uns dos outros. De acordo com Golmakani e Moakedi (2012) esse tipo de sistema tem sido estudado mais profundamente nas últimas décadas pois é possível se considerar por um lado que esses sistemas são muito complexos, por levarem em conta as interações entre os componentes, e por outro lado essa interação permite agrupar a manutenção dos componentes podendo reduzir custos.

Para Cho e Parlar (1991) os sistemas multicomponentes utilizam modelos de manutenção que preocupam-se com políticas de manutenção ótimas para sistemas compostos por diversos componentes, que podem ou não possuir dependências. Dessa forma, tais modelos objetivam definir uma política de manutenção ótima que considere a interação entre tais componentes.

As interações entre os componentes, também chamada por alguns autores como dependência entre os componentes, podem ser consideradas basicamente de três formas diferentes: econômica, estrutural e estocástica. A interação *econômica* pode significar que há aumento (dependência econômica negativa) ou diminuição (dependência econômica positiva) nos custos de manutenção quando os componentes são agrupados, quando comparados a um sistema de único componente. Já a interação *estocástica* diz respeito a avaliação do comportamento de falhas dos componentes, ou seja, quando a condição de um componente

pode afetar a distribuição do tempo de vida de outro. E, por fim, a interação *estrutural* implica que para fazer a manutenção em um componente, necessariamente outro precisa ser parado, ou seja, ambos pertencem a uma mesma estrutura (THOMAS, 1986; CHO; PARLAR, 1991; DEKKER; WILDEMAN; SCHOUTEN, 1997; GOLMAKANI; MOAKEDI, 2012; VU *et al.*, 2014; CAVALCANTE; LOPES, 2014).

2.4 Manutenção oportuna

A definição de Manutenção Oportunista ou Oportuna (MO) está ligada com a estratégia de realizar uma ação de manutenção preventiva em determinado equipamento devido a uma oportunidade gerada por uma falha ou por uma substituição preventiva em outro equipamento pertencente ao mesmo sistema (AB-SAMAT, KAMARUDDIN, 2014). O princípio dos estudos de manutenção oportunista foi por intermédio do grupo RAND Corporation em que no ano de 1962, Radner e Jorgenson publicaram um capítulo de um livro intitulado “*Optimal replacement and inspection of stochastically failing equipment*”, em que os autores afirmam que este tipo de manutenção está associado a um grupo de componentes pertencentes a um todo, em que as ações de manutenção em uma parte depende de informações de outras partes.

É possível comprovar a definição de Manutenção Oportuna no seguinte trecho: “*For systems with more than one part the possibility arises of allowing maintenance decisions with respect to one part to depend upon information about the states of other parts. In particular, it may be possible to take advantage of ‘economies of scale’ in replacement times.*” (RADNER; JORGENSON, 1962, p.194). Neste estudo os autores desenvolveram um modelo para um sistema composto por duas partes, que possuem dois estados, bom e falho, e o sistema é considerado bom, somente se ambas as partes estiverem no estado bom, em que somente uma das partes é monitorada através de inspeções, no momento da inspeção da parte que é monitorada e a decisão está em não fazer nenhuma troca, fazer a troca apenas de uma das partes, ou então fazer a troca das duas partes.

A oportunidade pode ser caracterizada como sendo uma variável aleatória que ocorre randomicamente e possui tempo de duração limitado, tendo em vista que, na medida que esse tempo cresce pode haver aumento de tempo de *downtime*, elevando os custos de manutenção e possivelmente reduzindo a produção (DEKKER; VAN RIJN, 1995). De acordo com Rao e Bhadury (2000), ela pode surgir devido à parada por uma falha ou por paradas programadas do sistema, sendo realizada quando condições técnicas e econômicas possam ser satisfeitas de modo a alcançar os melhores resultados.

Para Kececioglu e Sun (1995), o objetivo de realizar Manutenção Oportuna está no fato de buscar ótimas decisões de substituição para os equipamentos envolvidos na política a qualquer momento, tendo em conta as possíveis combinações dos estados dos componentes no sistema, assim como verificando se os reparos e/ou substituições podem ser realizados juntos ou separadamente. Já para os autores Taghipour e Banjevic (2012) a MO é mais efetiva quando não há dependência estocástica e econômica entre os equipamentos do sistema sendo esse tipo de política mais benéfica quando o custo de manutenção para ações conjuntas nos equipamentos é menor do que quando realizado separadamente.

A fim de garantir a melhor vida útil para os equipamentos evitando falhas durante a operação, a MO tem também como objetivo reduzir o tempo de *downtime* da operação maximizando a confiabilidade e a vida útil dos equipamentos (SARANGA, 2004). Enquanto que Koochaki *et al.* (2012) afirmam que o objetivo da MO é agrupar a manutenção de dois ou mais componentes para diminuir os custos da manutenção, e Mohamed-Salah, Daoud e Ali (1999) dizem ser a redução do número de atividades da manutenção, com consequente redução do custo, o objetivo principal da MO.

Quanto ao tipo de distribuição de probabilidade que se adapta ao comportamento de chegadas de oportunidade, Volovoi e Valenzuela (2012) afirmam que nos casos em que elas ocorrem por eventos externos aleatórios, a distribuição exponencial é bastante apropriada.

Em relação às vantagens de se trabalhar com manutenção oportuna Cui e Li (2006) afirmam que é possível economizar custos de *set-up* quando se combina o reparo corretivo com o reparo preventivo. De maneira que, a manutenção oportuna passa a ter especial funcionalidade quando, por exemplo, para se realizar um reparo corretivo em alguns componentes faz-se necessário desmontar o sistema abrindo a oportunidade de reparar preventivamente alguns componentes, ou então quando um reparo corretivo possa ser adiado até o momento de se realizar uma ação preventiva em alguns componentes.

Ademais, Levrat, Thomas e Iung (2008) afirmam que uma das vantagens da MO é garantir a performance esperada do sistema. Para Pham e Wang (2000) a prevenção de realização de manutenção corretiva inesperada em componentes a um custo razoavelmente baixo é a principal vantagem da política de manutenção oportuna, sendo que essa redução pode acontecer porque a manutenção preventiva de um componente realizada juntamente com a corretiva de outro, pode ser realizada sem adicionar custos substanciais ao processo. Ab-Samat e Kamaruddin (2014) concluem que as vantagens da MO podem ser resumidas em: redução das falhas, redução do custo de manutenção e incremento na idade do componente ou sistema.

Quanto às desvantagens, Dekker, Wildeman e Schouten (1997) afirmam que se pode não saber com antecedência quando uma oportunidade irá acontecer, sendo mais difícil planejar as ações que serão tomadas. Os autores Cui e Li (2006) também tratam como desvantagem a possibilidade de falta de programação, principalmente quando se faz manutenção preventiva em uma oportunidade, pode-se deixar de fazer manutenção preventiva quando essa tinha sido planejada.

Pode-se ter um problema em estimar a medida certa de ações de manutenção que devem ser realizadas. Segundo os autores Wang, Chu e Mao (2008), algumas políticas são às vezes subdimensionadas e às vezes superdimensionadas. O que se tem visto nos modelos de MO são cálculos que buscam otimizar a manutenção ou buscando o menor custo, ou maximizando o desempenho do sistema, sendo que o sistema ótimo trata da resolução desses dois problemas, para que não sejam executadas manutenções excessivas com altos custos, nem manutenção de menos, para que as falhas não cheguem a um nível inadequado (ALDURGAM; DUFFUAA, 2013).

Levando em consideração que no desenvolvimento de uma política de manutenção pode ser importante considerar mais de um fator, como por exemplo custo de manutenção, *downtime*, confiabilidade, impactos ambientais e impactos humanos, são apresentados a seguir os conceitos referentes à Análise de decisão multicritério. Tal teoria é posteriormente aplicada no Capítulo 5, para o desenvolvimento do modelo de apoio à decisão multicritério, que tem como critérios a taxa de custo de manutenção por unidade de tempo e MTBOF.

2.5 Análise de Decisão Multicritério

A apresentação clássica de problemas de otimização está relacionada na seleção de uma alternativa de um conjunto de alternativas, que possa maximizar ou minimizar uma determinada função objetivo. No entanto, quando se trata de decisão multicritério, existem mais de um objetivo que precisam ser tratados ao mesmo tempo em um mesmo problema, no qual duas ou mais alternativas serão analisadas. É importante ressaltar que é possível que existam conflitos entre esses objetivos, no sentido de que enquanto um deseja maximizar uma função, outro deseja minimizar (DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

Abordagens para suporte à decisão multicritério podem ser conhecidas como “*Multiple criteria decision-making*” (MCDM) ou “*Multiple criteria decision-aid*” (MCDA), chamados de métodos multicritério de apoio à decisão. De acordo com De Almeida, Geiger e Morais (2018), ambos os termos são utilizados para representar abordagens que envolvem tomada de decisão,

apoio à decisão e análise de decisão, os quais utilizam uma ampla variedade de métodos que estabelecem a estrutura de preferência do tomador de decisão, analisam o ambiente em que ele está envolvido e avaliam alternativas.

Para Belton e Stewart (2002), um dos principais objetivos da utilização de MCDA na tomada de decisão está na possibilidade de auxiliar os tomadores de decisão a organizarem e sintetizarem as informações relevantes para a tomada de decisão, para que a possibilidade de arrependimento após a tomada de decisão seja reduzida, à medida que todos os critérios importantes para isso sejam levados em conta. Já para Cavalcante e Lopes (2015) os métodos tentam organizar e estruturar o processo decisório levando em consideração a consistência entre valores, metas e critérios para auxiliar na tomada de decisão.

Ainda de acordo com Belton e Stewart (2002), existe uma certa subjetividade associada aos problemas resolvidos com MCDM. Essa subjetividade acontece devido ao fato de que os problemas resolvidos através de métodos de apoio à decisão multicritério consideram as preferências do decisor para fazerem a avaliação dos critérios, o que muitas vezes pode ser subjetivo.

Em relação às características dos modelos de apoio à decisão multicritério, Roy (2005) afirma que existem três que necessitam ser destacadas: as alternativas, os critérios e a problemática. Uma alternativa representa uma possibilidade de escolha dentre um conjunto de possíveis alternativas. Além disso, as alternativas podem ser contínuas ou discretas. No caso discreto existe um conjunto A , composto por várias alternativas a_i disponíveis para a escolha, ordenação ou classificação pelos decisores, ou seja $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. E no caso contínuo existe uma série de problemas que podem ser representados dessa maneira, por exemplo os tempos entre manutenções, a temperatura, que qualquer ponto dentro de um espaço pode ser uma solução.

Os critérios podem ser definidos como formas construídas para avaliar ações potenciais de acordo com o ponto de vista do decisor. Esses critérios imprimem os principais fatores que devem ser considerados nas análises através de MCDA, sendo que todas as alternativas precisam ser avaliadas por todos os critérios. Já a problemática refere-se a qual o tipo de resultado que se pretende ter com a utilização do método, que pode ser uma ordem (*ranking*), uma escolha, ou uma classificação. Em uma problemática de ordem, as alternativas serão ranqueadas da melhor para a pior, ou vice-versa. Na problemática de escolha, uma alternativa será escolhida como a melhor dentre todas e, a de classificação, objetiva colocar cada alternativa em uma classe pré-determinada.

Existem algumas formas de se realizar a classificação dos Métodos de apoio à decisão multicritério, sendo que uma das mais utilizada é a classificação em métodos compensatórios e métodos não compensatórios. Essa classificação considera a estrutura de preferências do decisor, avaliando de que forma a agregação entre os critérios é avaliada (CAVALCANTE; ALENCAR; LOPES, 2017).

Os métodos compensatórios são aqueles que consideram existir *trade-off* na avaliação das alternativas entre os critérios, ou seja, existe uma compensação entre eles. Neste caso, a perda de desempenho em um critério pode ser compensada, de forma ilimitada, pelo ganho em outro. Sendo assim, as alternativas podem interagir entre si nos diferentes critérios durante a avaliação do problema. Dentre os métodos compensatórios podem-se destacar alguns, tais como SMARTS e SMARTER (*Simple Multi-Attribute Rating Technique using Swings* e *Simple Multi-Attribute Rating Technique using Exploiting Rankings*), MACHBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Technique*), AHP (*Analytic Hierarchy Process*), que são métodos determinísticos, e MAUT (*Multi-attribute Utility Theory*) que é um método probabilístico (DE ALMEIDA, 2013).

Os métodos de apoio à decisão multicritério que utilizam a racionalidade compensatória, avaliando *trade-offs* entre os critérios, cujas consequências podem ser determinísticas, são conhecidos como MAVT (*Multi-attribute Value Theoria* – Teoria de Valor Multicritério) (DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

Já os métodos não compensatórios são caracterizados por não permitirem a compensação mencionada anteriormente. Isto é, neste caso os pesos dos critérios são importâncias relativas de cada um deles, não havendo *trade-off* entre os mesmos. Constituem exemplos dessa classificação, a família de métodos ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*) e PROMETHEE (*Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*). De acordo com De Almeida (2013), a análise dessa classificação é importante no processo de tomada de decisão para a escolha do método de apoio que será utilizado, uma vez que, havendo características de um deles, métodos de outro não podem ser utilizados.

Algumas vantagens na utilização de MCDA para auxílio na tomada de decisão podem ser apontadas. Para Bouyssou *et al.* (2000), a possibilidade de considerar um diálogo entre diferentes decisores no processo de decisão e a consideração de objetivos que podem ser conflitantes podem ser consideradas as principais vantagens. Em contrapartida, para Zopounidis (1999), esses métodos facilitam a avaliação de problemas complexos, por

considerarem critérios quantitativos e qualitativos na avaliação incluindo a participação do decisor, resultando entendimento melhorado das especificidades do problema.

2.6 Síntese conclusiva do capítulo

O Capítulo 2 teve como objetivo conceituar os temas centrais dessa tese: Manutenção, *delay-time*, manutenção oportuna e Análise de Decisão Multicritério, além de apresentar algumas definições relacionadas a esses termos. Em relação ao primeiro deles, a manutenção, foi exposto os motivos pelos quais as empresas buscam hoje otimizar seus sistemas incluindo a análise da manutenção para que os custos e *downtime* sejam reduzidos, enquanto que a confiabilidade, qualidade dos produtos e reputação da empresa sejam aumentados.

Além disso, foi definido o processo de chegadas de falhas através de *delay-time*, o qual é utilizado nos modelos desenvolvidos no trabalho. Em seguida a manutenção oportuna foi definida, como sendo uma janela de tempo fornecida por algum tipo de parada do sistema para que o componente possa sofrer manutenção preventiva, apresentando também as vantagens e desvantagens de utilização desse tipo de manutenção.

Por último, foram apresentados os conceitos relacionados à análise de decisão multicritério, que serão necessários para a construção do modelo de apoio à decisão multicritério que será apresentado no Capítulo 5. Dessa forma, pode-se dizer que o objetivo principal do capítulo foi atingido.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura tem como objetivo apresentar os avanços nas pesquisas sobre o tema do trabalho, buscando identificar uma lacuna existente entre o que já foi proposto e o que pode ser desenvolvido. Dessa forma, são apresentados em ordem cronológica os trabalhos publicados na área de manutenção oportuna e de inspeção imperfeita.

3.1 Manutenção oportuna

É interessante começar pelo primeiro trabalho apresentado em revistas nessa área desenvolvido por Radner e Jorgenson (1963), no qual os autores consideram ser uma vantagem utilizar uma política de manutenção oportuna por existir economia de escala e um sistema que possui várias partes com falhas estocásticas, considerando um sistema com várias partes sendo monitoradas, com exceção de uma.

Assim, se as partes monitoradas possuem uma distribuição exponencial para o acontecimento de uma falha, o modelo que Radner e Jorgenson (1963) desenvolveram considera que a parte que não é monitorada receba a nomenclatura de 0 (zero), e as partes monitoradas M , então existem $(M + 1)$ números, $(n_1, \dots, n_M, N)$, tal que $0 \leq n_i \leq N \leq \infty$, de forma que:

1. Substituir apenas a Parte i , se a Parte i falhar em um tempo quando a idade da Parte 0 esteja entre 0 e n_i , com $(i = 1, \dots, M)$.
2. Substituir a Parte 0 e i juntas, se a Parte i falhar em um tempo quando a idade da Parte 0 esteja entre n_i e N .
3. Substituir a Parte 0 sozinha, se a Parte 0 atingir a idade N a um tempo quando as partes estão boas.

E os autores demonstraram que N é finito, com exceção de quando a parte monitorada tem confiabilidade tendendo a zero, pois nesse caso a idade tende ao infinito. Como modificação para esse modelo, Kececioglu e Sun (1995) propuseram utilizar diferentes distribuições de probabilidade para a vida dos componentes do sistema avaliado através de uma abordagem que considera o conceito de idade mais avançada, e também de uma técnica de redução de dimensionalidade.

Posteriormente, Vergin e Scriabin (1977) avaliaram um sistema em que os equipamentos possuíam dependência econômica entre eles. Através de programação dinâmica, eles

desenvolveram um modelo que considera substituição em grupos, chamado de (n, N) policy. Um equipamento será submetido a manutenção preventiva se ele já tiver operado por N períodos e será substituído em grupo se tiver operado por n períodos, em que $n < N$. Enquanto que L'Ecuyer e Haurie (1983) também utilizaram programação dinâmica para estudar um sistema com m componentes independentes e não idênticos, com taxa de falha crescente e com elevado custo fixo de substituição. A substituição usando manutenção oportuna pode proporcionar economias de escala e determina quais componentes devem ser substituídos preventivamente, além da substituição periódica.

Em seguida, Epstein e Wilamowsky (1985) apresentaram uma abordagem determinística para investigar o problema de manutenção oportuna de um sistema composto por dois componentes. Desenvolveram um modelo determinístico para encontrar o plano de manutenção ótimo quando é possível encontrar o tempo da oportunidade e das falhas já no início da modelagem, além disso, os dois componentes possuem limites de vida diferenciados, cujas possibilidades de substituição individuais geram oportunidades de economias de custos diferenciadas.

Liang (1985) desenvolveu uma política a qual nomeou de “*piggyback*”, que tem suas raízes na manutenção oportuna. De acordo com o autor, esse modelo se diferencia dos demais até então produzidos por dois motivos, primeiro diz respeito a parte que está trabalhando será restaurada somente se sua idade ultrapassar um certo limite T quando uma outra parte falhar. Segundo, a taxa de manutenção não planejada e a taxa de custo de serviço são tratadas separadamente, porque uma ou outra ou as duas são importantes, dependendo do ponto de vista.

Enquanto que Pullen e Thomas (1986) avaliaram um sistema composto por dois equipamentos, no qual um deles ($c1$) é considerado como uma parte que não falha o qual sempre é substituído em uma idade de vida limite se não for substituído oportunisticamente, e o outro possui uma vida randômica com taxa de falha crescente. A política de manutenção oportunista é conduzida de acordo com um limite de controle de idade, em que:

1. $c1$ é substituído sozinho quando sua idade atinge seu limite de vida e $c2$ está abaixo.
2. $c2$ é substituído sozinho quando falha e $c1$ possui idade inferior.
3. Os dois componentes são substituídos juntos quando $c2$ falha e a idade do componente $c1$ tenha atingido o limite de idade, ou quando de $c1$ é realizada preventivamente e a idade de $c2$ tenha atingido o limite.

Dekker e Smeitink (1991) aplicaram a manutenção oportunista na substituição em blocos, de maneira que um componente é substituído somente em uma falha ou em uma oportunidade.

Neste caso, um componente será substituído preventivamente na primeira oportunidade que acontecer após um tempo crítico determinado pelo modelo, contado a partir da última manutenção preventiva. Eles focaram seu trabalho em dois modelos, um que eles chamaram de teórico, as oportunidades ocorrem independentemente do processo de renovação do sistema, e fornecem equação para otimização do custo sem suposições restritivas. Enquanto que no segundo, chamado de “*one-opportunity-look-ahead strategy*” existem duas alternativas, substituir o componente preventivamente na ocorrência da oportunidade, ou então substituir o componente na próxima oportunidade, com um custo extra. Os autores fornecem a forma de calcular os limites de controle e os custos, incluindo o custo de adiar a manutenção.

Pouco mais tarde, Zheng e Fard (1992) propuseram a utilização de um intervalo para a taxa de falha entre uma tolerância e um limite, sendo esse utilizado como um critério para substituição de mais de um componente ao mesmo tempo. A política desenvolvida é baseada nos seguintes pontos: um componente é substituído em uma falha, ou então substituído preventivamente quando a taxa de falha exceder o limite, o que ocorrer primeiro; ou então quando um componente é substituído preventivamente porque a taxa de falha excedeu o limite, todos os outros componentes que tenham suas taxas de falha dentro do intervalo levantado, serão substituídos preventivamente.

Já Zheng (1995) desenvolveu um modelo de manutenção baseado na idade dos componentes. Ele considerou que nesse modelo existiam n equipamentos independentes e identicamente distribuídos sendo que suas taxas de falhas aumentam com o passar do tempo. O componente é substituído quando atinge uma certa idade T , ou então quando ele falha, ambas produzem uma oportunidade para que outros componentes sejam substituídos preventivamente. Quando um componente é substituído, todos os outros componentes cuja idade esteja entre $(T - w, T)$ serão substituídos. O objetivo é encontrar o menor custo possível para a manutenção otimizando os valores de T e w .

Tan e Kramer (1997) utilizaram uma integração de algoritmo genético e simulação de Monte Carlo para desenvolver um modelo de manutenção preventiva baseada em oportunidade, e segundo eles, alcança algumas vantagens quando comparado a métodos que utilizam cadeias de Markov no que tange a exatidão, versatilidade e tratamento da solução. A aplicação do modelo foi na indústria química, que para eles é um setor que precisa eficiência na manutenção e utilização do tempo, pois se trata de equipamentos altamente sensíveis e críticos para a operação, cujas consequências de falhas são críticas.

Ainda sobre modelo baseado na idade, Jhang e Sheu (1999) consideraram em seu trabalho um sistema composto por dois tipos de falhas, do Tipo I que é reparada através de um mínimo reparo, e do Tipo II que é removida somente com substituição, ambas são dependentes em idade (*age-dependent*). O sistema é substituído após uma falha do Tipo II ou então em uma oportunidade que ocorra depois de uma certa idade T , em que o modelo busca minimizar o custo através da otimização de T .

Pham e Wang (2000) desenvolveram dois modelos considerando manutenção oportunista. Eles consideraram que somente mínimos reparos são realizados até o momento τ em componentes que estão com falhas, e a manutenção corretiva é combinada com a manutenção preventiva para todos os componentes defeituosos após τ . Além disso, se o sistema resistir até um certo tempo T sem ter sofrido manutenção perfeita, ele será submetido a manutenção nesse tempo. Considerando isso, eles desenvolveram o cálculo para a o custo e a disponibilidade do sistema.

Bevilacqua e Braglia (2000) utilizaram o método AHP para selecionar a melhor estratégia de manutenção para ser aplicada nos setores de uma refinaria de óleo na Itália. Eles consideraram cinco alternativas de manutenção: preventiva, preditiva, baseada em condição, corretiva e oportunista. Para os casos em que a oportunidade ocorra perto de um certo tempo T a manutenção oportuna foi indicada, além de ser indicada na priorização das atividades a serem executadas.

Satow e Osaki (2003) desenvolveram um modelo que considera que a taxa de chegadas de oportunidades no sistema pode ser modificada em uma certa idade, diferenciando-se dos demais modelos que utilizam um processo homogêneo de *Poisson* para modelar essa chegada. A manutenção preventiva é realizada na primeira oportunidade após um determinado tempo T , e buscam o melhor custo de manutenção em um horizonte de tempo infinito.

Wang e Christer (2003) produziram três algoritmos para buscar o melhor tempo de inspeção para um sistema multicomponentes levando em consideração *delay-time*. A diferença entre esses três algoritmos estava em que o primeiro considerava as chegadas de defeitos através de um processo não homogêneo de Poisson, o segundo considerava que o intervalo entre as inspeções era não constante e o terceiro que poderiam haver inspeções através de oportunidade nas falhas. Já Saranga (2004) utilizou algoritmo genético para identificar quais itens devem ser atendidos pela manutenção oportunista, e, assim, verificar qual é a relação de custo benefício da sua utilização comparada ao que era utilizado anteriormente, sendo que o algoritmo é capaz de identificar se a manutenção oportuna é ou não rentável.

Das e Acharya (2004) apresentaram dois modelos em que o processo de falha ocorre de acordo com o modelo de *delay-time*. O primeiro deles recomenda a substituição do componente defeituoso na falha, ou então preventivamente após um determinado tempo estipulado durante o *delay-time*. O segundo modelo adiciona a manutenção oportunista ao primeiro, em que o componente será substituído na primeira oportunidade que surgir após um determinado tempo fixo. Eles verificaram que o segundo modelo se mostra mais eficaz quando o custo para paradas forçadas é maior do que o custo para realizar manutenção preventiva durante uma oportunidade.

Enquanto que Castanier, Grall e Bérenguer (2005) criaram um modelo utilizando a manutenção baseada em condição para um sistema de duas unidades que deterioram gradualmente com o tempo, e são monitoradas não periodicamente. Cada inspeção ou substituição implica um custo de instalação e um custo unitário específico, mas se as ações nos dois componentes forem combinadas, o custo de configuração é cobrado apenas uma vez. Embasaram o modelo nas propriedades semi-regenerativas do estado do sistema com intuito de minimizar os custos.

Considerando equipamentos cujos tempos de vida são dependentes e que os graus de reparo entre os componentes também são correlacionados, Cui e Li (2006) desenvolveram um modelo para um sistema de componentes sujeitos a danos correlacionados de choques que chegam ao sistema de acordo com um processo pontual. Segundo os autores, as falhas e as correlações econômicas, além da dependência estocástica introduzida pela manutenção oportunista, complicam a estrutura de dependência de falhas em vários componentes. Os resultados da pesquisa deles mostraram que o número de ocorrências de falhas entre todos os componentes é positivamente correlacionado ao longo do tempo se os danos e os graus de reparo em vários componentes estiverem positivamente correlacionados no sentido de associação, além do que, um modelo de choque com manutenção oportunista possui menos falhas em vários componentes do que um modelo de choque semelhante sem tal manutenção.

Zequeira, Valdes e Bérenguer (2008) demonstraram um modelo de manutenção integrado com gestão de estoques. Esse modelo considera a produção de itens sobressalentes, com tamanho S , para que no momento da manutenção não haja falta de produtos, sendo que as ações de manutenção iniciam na primeira oportunidade após o término da fabricação do estoque. Eles propõem encontrar um determinado tempo T , após a última ação de manutenção, para se produzir o estoque de segurança, objetivando diminuir o número de paradas da produção, aumentando a disponibilidade e reduzindo os custos globais com manutenção. Eles observaram

que quando T aumenta o número esperado de falhas também aumenta, preocupando-se então em encontrar os valores ótimos para T e S .

Ainda relacionando a produção com as paradas para manutenção, Levrat, Thomas e Iung (2008) propuseram integrar a manutenção com o planejamento da produção. Para isso, a programação da manutenção é feita a partir da programação da produção, que não é alterada, assim, o objetivo é selecionar, dentre todas as paradas de produção já planejadas, aquelas que serão ótimas para desenvolver tarefas de manutenção, preservando as condições esperadas do produto.

Zhou, Xi e Lee (2009) propuseram um algoritmo para gerenciamento da manutenção oportunista baseado em programação dinâmica introduzindo manutenção imperfeita nas ações de manutenção para um sistema multicomponente. A manutenção imperfeita foi considerada utilizando o método de fator melhorado, na qual em uma ação preventiva de manutenção a taxa de risco do componente é melhorada, porém não chega a um nível de ser como um novo.

Um planejamento para manutenção preventiva para um sistema multicomponentes em série foi desenvolvido por Laggoune, Chateauneuf e Aissani (2009). O sistema considerado está sujeito a falhas aleatórias em que a taxa de custo é minimizada considerando uma distribuição de probabilidade geral para a vida do sistema. A oportunidade é considerada quando o sistema está inativo, seja por uma ação corretiva ou preventiva. Um processo de solução utilizando simulação de Monte Carlo foi utilizado e aplicado em um compressor de hidrogênio em uma refinaria.

Bedford *et al.* (2011) produziram um modelo para avaliação de um sistema que apresenta sinais quando a situação de deterioração do sistema se modifica. Esses sinais são utilizados para realizar a manutenção oportuna, baseada na condição conforme o risco de falha usando a estimativa de tempo de vida do período. Uma ação de manutenção preventiva será realizada na primeira oportunidade observada em $(1 \leq c \leq m)$, em que c representa o sinal crítico indicando o aumento do risco, ou seja, antes deste sinal a manutenção oportuna não é considerada.

Koochaki *et al.* (2012) simularam um pequeno sistema em série composto por três equipamentos para avaliar a efetividade da aplicação da política de manutenção baseada em condição considerando manutenção oportuna. Os resultados mostraram que a política permanece rentável com um sistema multicomponente, mas é menos efetiva que a política de manutenção baseada na idade.

Considerando um sistema com componentes independentes e que existem falhas do tipo *hard* e *soft*, Taghipour e Banjevic (2012) apresentaram dois modelos. O primeiro trata de que componentes do tipo *soft* são inspecionados periodicamente e através de oportunidade para encontrar possíveis falhas e no segundo modelo falhas de componentes do tipo *hard* são submetidos a inspeção periódica e preventivamente substituídos dependendo da sua condição na inspeção. A manutenção oportunista é considerada por eles quando ocorre uma falha *hard* e que tenha possibilitado a inspeção nos demais componentes, e caso estes estejam com uma falha *soft* serão também reparados, além do que dois componentes com falha *hard* não podem falhar ao mesmo tempo.

Ding e Tian (2012) desenvolveram um modelo de manutenção oportuna para parques eólicos. Eles consideraram que a cada momento em que ocorresse uma falha no sistema, uma ação de manutenção preventiva era indicada para o componente que atingia um determinado nível de idade definido previamente para os componentes, sendo que essa ação preventiva poderia ser perfeita, imperfeita ou então de dois níveis. Para resolver o modelo eles utilizaram simulação, e os testes comparativos com o modelo tradicional mostraram que a utilização da manutenção oportuna diminui os custos de manutenção.

Ainda sobre sistemas que fazem parte de redes de energia Hu e Zhang (2014) afirmam que o aspecto de segurança é muito importante, e que o impacto de um acidente causado por uma falha tem maior significância que os custos de manutenção. Atendendo esse perfil, os autores desenvolveram um modelo que utiliza uma abordagem de manutenção oportunista baseada em risco de falha, considerando fatores de segurança, através de uma otimização global.

Integrando a produção com a manutenção, Tambe, Mohite e Kulkarni (2013) consideraram um modelo de manutenção oportunista para um sistema composto de vários componentes para tomar decisões de manutenção com uma restrição no tempo disponível e nos requisitos de disponibilidade do sistema. Eles consideram o efeito que uma falha pode ter na qualidade dos produtos, assim como também o cronograma de produção de cada equipamento, sendo que o atraso no cronograma da produção é considerado como uma restrição para o modelo. Para encontrar a solução ótima do problema, os autores utilizaram algoritmo genético, heurística de sequência e simulação, definindo o custo de manutenção, custo de *downtime*, custo de falha e custo de rejeição.

Já Cheng, Yang e Guo (2013) desenvolveram um modelo de manutenção oportuna com dependência econômica entre os componentes, em que o processo de falha dos dois

componentes considerados são diferentes, um através de um processo de deterioração Gama, e outro por um processo aleatório de *Poisson*. O estado dos componentes é verificado somente através de inspeção. São utilizados parâmetros de decisão para minimizar a taxa do custo de manutenção de longo prazo do sistema, cujo processo de resolução do problema é baseado nas características do processo Gama. Os parâmetros são limite de manutenção preventiva, limite de manutenção corretiva e intervalo periódico de inspeções.

Cavalcante e Lopes (2014) apresentaram um modelo de decisão multicritério que considera dois critérios de avaliação, custo e disponibilidade, levando em consideração a manutenção oportuna para sistema de emergência que fornece energia quando uma falha ocorre no sistema primário de energia de uma instalação de saúde. Pouco mais tarde Cavalcante e Lopes (2015) publicaram outro modelo que utiliza a combinação de manutenção oportunista com, múltiplos critérios para um sistema de cogeração de uma usina que utiliza o bagaço da cana avaliando o custo e a disponibilidade ao mesmo tempo. Os autores consideraram como contribuição do artigo desenvolvido os seguintes pontos: 1. Aplicação do modelo em um caso real. 2. Levar em consideração as preferências do decisor na tomada de decisão; 3. O desenvolvimento de um modelo que apresenta o tempo ótimo para realizar uma ação, mas também o tipo de ação a ser tomada.

Kumar, Jain e Gandhi (2014) utilizaram o processo de Semi-Markov para desenvolver uma metodologia para avaliar a disponibilidade de sistemas mecânicos reparáveis em estado estacionário utilizando uma política de manutenção baseada na oportunidade. Os autores fizeram uma comparação para três casos de manutenção corretiva: com reparo perfeito, mínimo e imperfeito, com e sem oportunidade, verificando ser a metodologia eficiente no quesito de aumento da disponibilidade do sistema.

O artigo de Vu *et al.* (2014) trata de uma estratégia de manutenção para um agrupamento dinâmico em sistemas complexos, sendo que pode haver na estrutura desses sistemas dependência econômica positiva ou negativa, o que tem influência significativa no agrupamento dos componentes. Para desenvolver o modelo de solução os autores utilizaram algoritmo genético, e uma avaliação de oportunidades limitadas no tempo foi incluída, o qual foi testado em um sistema composto por 12 componentes.

Zhang e Zheng (2014) propuseram um modelo que pode ser aplicado tanto para sistemas de único componente como para multicomponentes, para esse último é necessário que todos sejam idênticos.

O trabalho desenvolvido por Zhou *et al.* (2015) tem como objetivo desenvolver um modelo de manutenção oportunista que considera os gargalos nos sistemas de produção em série, em que as ações de manutenção podem ser imperfeitas. Utilizaram simulação para encontrar os resultados de uma função de economia de custo utilizando manutenção oportuna, para descobrir a estratégia ideal. Os autores Geng, Azarian e Pecht (2015) também utilizaram simulação para encontrar o valor ótimo da política estabelecida, através de Simulação de Monte Carlo. No entanto, a contribuição do seu estudo está no fato de os autores considerarem ao mesmo tempo dois tipos de dependência, estrutural e econômica, entre os componentes. A ação de manutenção a ser tomada é determinada pela análise da vida virtual e da expectativa de vida do componente e dos limites de vidas impostos.

Gunn e Dialo (2015) construíram uma rede em árvore de falhas para o problema de manutenção oportuna de agrupamentos indiretos de eventos periódicos. Eles mostraram que, dado um horizonte de tempo fixo e um número moderadamente grande de componentes principais, o problema pode ser representado como uma árvore de possíveis combinações de substituição. Foi implementado um algoritmo em Python para resolver o problema. Já Shafiee, Finkelstein e Bérenguer (2015) deram o enfoque do seu modelo para turbinas eólicas *offshore*, em que essas estejam sujeitas a degradação e choques ambientais.

Alguns autores trabalharam na construção de modelos específicos para parque de energia eólica, podendo ser *onshore* ou *offshore*. Dentre eles pode-se destacar Abdollahzadeh, Atashgar e Abbasi (2016) que produziram um modelo multiobjetivo a fim de maximizar a energia produzida e minimizar os custos totais de manutenção, considerando o comportamento estocástico da velocidade dos ventos e a existência de um número limitado de equipes de manutenção. Já Sarker e Faiz (2016) consideraram que as ações de manutenção são feitas em níveis diferentes, e o modelo pretende otimizar o custo de manutenção considerando que este depende da faixa etária dos componentes, o que determina quais deles devem ser reparados prioritariamente.

Ainda sobre parques de energia eólica, Yildirim, Gebraeel e Sun (2017) propuseram uma avaliação da manutenção nesse setor que integra uma metodologia de análise preditiva através da utilização de sensores em tempo real para prever degradação futura e um modelo de otimização que transforma essas previsões em otimização dos lucros e das decisões. Consideram a troca entre o cronograma de manutenção ideal orientado pelo sensor, e as reduções de custos devido o agrupamento para manutenção das turbinas eólicas.

Zhao, Chen e Zhou (2016) desenvolveram um modelo geral para manutenção baseado em três parâmetros (N, T, τ) , em que N é o número de falhas dos componentes, T é a vida esperada do sistema, e τ o intervalo entre inspeções periódicas. O modelo deles se diferencia pela introdução de inspeções periódicas que podem ser utilizadas para evitar uma inspeção periódica logo após a manutenção oportunista, sendo que os custos de manutenção podem ser reduzidos através de uma reprogramação da inspeção periódica planejada após a manutenção oportunista com um intervalo τ .

Zhang *et al.* (2017) utilizaram dois limites, um para manutenção preventiva e outro para a manutenção corretiva, considerando a manutenção oportuna e manutenção imperfeita baseada na confiabilidade para desenvolver seu modelo de manutenção. Além disso, eles utilizaram um modelo híbrido de taxa de falha para descrever a manutenção imperfeita e explicar os efeitos das ações de manutenção corretiva.

Xia *et al.* (2017) utilizaram o conceito de *Reconfigurable Manufacturing Systems* (RMS – Sistemas de Manufatura Reconfiguráveis) no seu trabalho conjuntamente com a manutenção oportuna. Produziram um modelo que investiga uma janela de manutenção, através da obtenção de intervalos dinâmicos pelo modelo de manutenção de múltiplos atributos. Durante os estágios de fabricação os intervalos entre inspeções, que são dinâmicos, são definidos como critérios para separar as ações de manutenção preventiva em subsistemas paralelos, e combinar as ações de manutenção preventiva em subsistemas em série quando a máquina está em *downtime*, o que leva a oportunidades para outras máquinas sem falhas, com aplicação em um sistema de transporte portuário.

Truong Ba *et al.* (2017) propuseram um modelo para manutenção oportuna considerando oportunidades não homogêneas e que a duração da oportunidade possui um comportamento estocástico, sendo que o critério para aceitar a manutenção oportuna é a minimização do custo total por ciclo, resolvido através da utilização de algoritmo genético. Também avaliando a minimização do custo, Zhang e Zheng (2017) desenvolveram um modelo que integra a manutenção oportuna baseada em condição e a gestão de sobressalentes.

Marsaro e Cavalcante (2017) propuseram um modelo simulado que considera um sistema multicomponente composto por dois componentes. A falha de um dos componentes é identificada somente em inspeção e, quando esse componente é verificado como falho, uma oportunidade de inspeção para o outro componente é apresentada.

Já Kang e Subramaniam (2018) desenvolveram um modelo integrado entre a produção e a manutenção. Os autores chamam de modelo de manutenção dinâmica por integrar

Manutenção Corretiva, Preventiva e Oportuna na mesma análise, cujo objetivo é alcançar o menor custo de produção total que inclua custos de estoque, *backlog*, reparo, manutenção preventiva e oportuna. O modelo utiliza a técnica de aproximação e um algoritmo de integração de valor para encontrar os resultados do modelo. Para eles, é satisfatório o modelo pois quando comparado a outros, é economicamente mais viável.

Yang *et al.* (2018) desenvolveram um artigo na área de manutenção oportuna que é fundamentado na manutenção baseada em condição, levando em conta a operação e características de degradação de um sistema. Como contribuição, os autores afirmam ser a inclusão de dois níveis de manutenção corretiva e limites de controle, que analisados conjuntamente procuram fazer a alocação de recursos adequadamente para uma manutenção flexível e efetiva em termos de custo. Foi feita uma comparação com os métodos tradicionais de avaliação de manutenção, o que mostrou ser efetivo o modelo apresentado, que foi testado em um estudo de caso.

Outros autores que também utilizaram manutenção baseada em condição em seus artigos podem ser citados. Dentre eles Zhao *et al.* (2018) em que a manutenção no equipamento é executada se o valor da condição averiguada exceder um determinado limite estipulado através de funções. Já Poppe, Boute e Lambrecht (2018) utilizaram múltiplos limites de degradação, cuja aplicação foi realizada em uma indústria de ar comprimido e geradores. E Song *et al.* (2018) aplicaram seu modelo em um parque eólico *offshore*, o qual integra o *design* de *layout* e a política de manutenção em um modelo de otimização em dois estágios.

E, por fim, Colledani, Magnanini e Tolio (2018) utilizaram em seu artigo uma estrutura de modelagem e uma metodologia para prever o efeito da frequência e duração de ações de manutenção oportunista no desempenho do sistema, o qual foi testado em um caso real em uma indústria moveleira.

Outro tema importante para o presente trabalho é a inspeção imperfeita, o qual será apresentado a seguir, e uma revisão dos trabalhos publicados com essa temática é apresentada.

3.2 Inspeção imperfeita

Diversos trabalhos foram desenvolvidos utilizando os conceitos acima apresentados. Para ter uma visão geral acerca do tema inspeção imperfeita, a seguir serão expostos alguns trabalhos publicados na área de forma cronológica.

O autor A. H. Christer trabalhou com o desenvolvimento de diversos modelos para manutenção utilizando a modelagem do processo de chegadas de falhas através de *delay-time*,

e em alguns de seus trabalhos, juntamente com outros autores, utilizavam o termo “*non-perfect inspection*” (inspeção não perfeita) como sinônimo para inspeção imperfeita. Quando havia a utilização desse termo, uma probabilidade de que o defeito seja encontrado em uma inspeção periódica era considerado. Dentre esses trabalhos pode-se citar Christer e Waller (1984), avaliando a interferência da inspeção imperfeita na probabilidade de um defeito chegar devido a uma quebra, Christer e Redmond (1992) fizeram uma comparação entre diversos modelos que já haviam sido publicados analisando o efeito da probabilidade de um defeito ser encontrado em uma inspeção. Christer *et al.* (1998) consideraram que o defeito pode não ser totalmente corrigido em uma ação de manutenção devido ao limite de tempo para isso, e Christer e Lee (2000), assumiram que o *downtime* devido a falhas pode não ser tão pequeno quando comparado o tempo do tamanho do ciclo.

Um dos primeiros trabalhos a apresentarem o termo inspeção imperfeita foi apresentado por Kaio e Osaki (1986) no qual os autores consideraram um sistema de um único componente, sendo que o estado dele é identificado apenas através de inspeção. Os autores consideraram que a inspeção imperfeita pode ocorrer de duas formas, através de duas probabilidades diferentes: a primeira considera que o sistema seja falho, estando ele em boas condições; e a segunda o sistema está bom e é considerado como falho. Utilizaram esse novo conceito para encontrar um modelo que minimizasse o custo de manutenção esperado.

Tagaras (1988) produziu um modelo de custo que analisa e otimiza a integração do processo de controle da produção e as operações de manutenção, analisando a relação entre o controle estatístico de processo e a manutenção preventiva. O modelo apresentado por ele incorporou as cartas de controle, levando em conta o processo de degradação dos componentes, inspeção e restauração imperfeitas. Enquanto que no trabalho de Yun e Bai (1988) o custo do reparo de um item era avaliado em uma inspeção. Se esse custo for superior a um determinado limite, o sistema é substituído, e se for inferior o sistema é reparado. O problema estava no fato de que a inspeção era imperfeita, podendo ter irregularidades na estimação desse custo.

Devooght, Dubus e Smidts (1990) consideraram que os componentes do sistema analisado poderiam visitar uma quantidade muito maior de estados que evolui de acordo com o modelo contínuo de semi-Markov. Porém, a detecção desses estados é imperfeita, assim como a ação de reparo, devido a falhas humanas ou problemas na instrumentação. O objetivo é minimizar o custo total da política.

Baker e Wang (1991) propuseram uma maneira de desenvolver as funções que regem o processo de falha dos componentes que são representados pela política de *delay-time*, e

encontrar parâmetros mais realísticos, considerando o fato de que as inspeções possam ser imperfeitas. Pouco mais tarde, esses mesmos autores publicaram um novo artigo apresentando algumas modificações para o primeiro modelo. Dentre elas está que a idade da máquina influencie no período de substituição do componente, na visibilidade do defeito e no período de *delay-time* até o acontecimento da falha, que uma inspeção pode ter um efeito benéfico ou perigoso em relação a vida útil da máquina (BAKER; WANG, 1993).

No estudo de Pellegrin (1991) um sistema com manutenção baseada em inspeção imperfeita periódica e o controle de um parâmetro de condição que descreve o desgaste e a deterioração do equipamento foram considerados. O modelo desenvolvido está baseado em *delay-time* e foi construído um procedimento gráfico para encontrar o melhor tempo entre inspeções, o que, segundo o autor, permite enfatizar os fatores relevantes para a tomada de decisão. Posteriormente, Srivastava e Wu (1993) realizaram uma pesquisa na qual eles consideraram que existia uma certa probabilidade de que um defeito fosse encontrado em um sistema composto por vários componentes, em que suas vidas esperadas são identicamente distribuídas através de uma distribuição exponencial. No entanto, o modelo foi testado para os casos em que o parâmetro da distribuição é conhecido e para quando não é.

Okumura, Jardine e Yamashina (1996) utilizaram o conceito de *delay-time* para modelar o processo de falha do componente avaliado, em que consideraram dois tipos de probabilidades para a execução da inspeção: probabilidade que o sistema seja diagnosticado como bom, mas na verdade está falho, também chamado por eles de probabilidade de *failed-dangerous* e a probabilidade que o sistema seja diagnosticado como ruim quando ele está bom, chamado por eles de *failed-safe*. O objetivo foi buscar minimizar o custo a longo prazo por unidade de tempo em um sistema monocomponente, determinando, através de uma nova metodologia de cálculo, o tempo entre inspeções para aplicação efetiva da manutenção baseada em condição.

Em contrapartida, Williams e Hirani (1997) consideraram a existência de vários estados para os equipamentos de um sistema, em que a inspeção imperfeita pode influenciar no tempo disponível para a próxima inspeção a ser realizada, buscando minimizar o custo relacionado com a política de manutenção. Com uma modelagem específica para um problema de soldas, Scarf, Wang e Laycock (1996) analisaram as profundidades máximas que trincas de soldas podem atingir, sendo que o modelo desenvolvido seja capaz de prever o crescimento das fissuras com o passar do tempo e que minimize o custo total de manutenção de longo prazo por unidade de tempo. Uma das extensões do modelo proposta por eles é a consideração que a inspeção seja imperfeita.

Dagg e Newby (1998) utilizaram a inspeção imperfeita em seu modelo para um sistema que pode visitar três estágios: bom, defeituoso e falho, em que o custo médio por unidade de tempo foi calculado. O sistema é periodicamente inspecionado podendo ocorrer falso positivo e falso negativo, e no caso de encontrar um problema o sistema é reparado, porém esse reparo pode ser imperfeito. O objetivo é otimizar tanto o custo como a quantidade de ações de inspeção a serem feitas.

Bukowski (2001) considerou modelar a inspeção e os reparos de equipamentos perfeitamente e imperfeitamente. Ele apresentou um método para incorporar nos modelos de Markov as inspeções periódicas e reparos que ocorram deterministicamente no tempo para calcular alguns índices de desempenho importantes, tais como MTTF (*Mean Time to Failure* – Tempo médio para a falha), disponibilidade média do sistema e probabilidade média de ocorrência de falhas perigosas.

Wang e Sheu (2003) utilizaram dois tipos de possíveis erros na inspeção: o primeiro em que o processo é declarado fora de controle quando está sob controle, e no segundo o processo é declarado em controle quando ele está fora de controle, cada um com probabilidades diferentes. Um modelo matemático foi desenvolvido por eles utilizando Cadeias de Markov para determinar juntamente o ciclo de produção, os intervalos de inspeção e o nível de manutenção, buscando minimizar o custo esperado.

Outro trabalho sobre análise de corrosão foi apresentado por Kallen e van Noortwijk (2005) em que os autores utilizaram um processo Gama para modelar o mecanismo de dano por corrosão e um teorema de Bayes para atualizar o conhecimento sobre a evolução da corrosão, em que o processo de inspeção da espessura das paredes é imperfeito. Enquanto que Zhao *et al.* (2007) utilizaram o processo não homogêneo de Poisson juntamente com a abordagem de *delay-time* para modelar um sistema em que os defeitos são múltiplos, em que os defeitos são identificados na inspeção, porém esta pode ser imperfeita. Eles apresentaram um algoritmo que otimiza o intervalo entre inspeções e busca maximizar a confiabilidade do componente.

O modelo produzido por Welte, Vatn e Heggset (2006) foi projetado para otimização e programação da manutenção e da renovação de sistemas. Para tanto eles modelaram o processo de deterioração dos equipamentos através de cadeia de Markov, em que seus parâmetros são baseados em parâmetros técnicos. Eles consideraram que as inspeções periódicas são imperfeitas, o que pode influenciar na determinação dos intervalos entre inspeções, que depende da condição a ser revelada em uma ação de inspeção.

Analizando sistemas que utilizam produtos químicos perigosos, em condição extrema de temperatura e pressão, Khan, Haddara e Bhattacharya (2006) propuseram uma metodologia baseada em risco para modelagem de integridade e inspeção, buscando garantir uma operação sem falhas e segura. Para tanto utilizaram o processo Gama para modelar a degradação dos componentes e de atualização bayesianas para melhorar a distribuição com base nos resultados reais da inspeção. A inspeção pode ser perfeita ou imperfeita, modelada de acordo com uma distribuição normal aleatoriamente distribuída. Eles buscaram identificar o intervalo ótimo entre as inspeções.

Um sistema cujos equipamentos podem sofrer três tipos de falhas (tipo, I, II e III) e três tipos de inspeção foi avaliado no modelo proposto por Zequeira e Bérenguer (2006). No modelo deles, a inspeção pode ser de três tipos, perfeita, parcial e imperfeita. A primeira detecta qualquer tipo de falha corretamente, sendo que a falha tipo III somente é detectada por esse tipo de inspeção, a segunda consegue detectar apenas alguns tipos de falhas corretamente, que são as falhas do tipo I, e a inspeção imperfeita detecta apenas falhas do tipo II. Esses tipos de falhas interferem no tamanho do ciclo, assim como no custo de manutenção, e cada tipo de falha necessita de um tempo entre inspeções diferentes. O objetivo é encontrar o menor custo de manutenção, otimizando o tempo entre inspeções perfeitas, o tamanho do ciclo e o tempo entre quaisquer inspeções.

Buscando minimizar o custo esperado ao longo de um tempo infinito, Badia e Berrade (2006) apresentaram um modelo que considera um sistema sujeito a falhas catastróficas não reveladas e falhas menores reveladas, sendo que as primeiras são identificadas somente através de inspeção, que é imperfeita. Enquanto que Zhao, Chan e Burrow (2007) fizeram um modelo de análise de risco especificamente para quebras de trilhos, considerando que a inspeção imperfeita ocorre em intervalos de tempos programados, sendo que o intervalo entre o início do defeito e a ocorrência da quebra é modelado pelo intervalo P-F, sendo que esse independe do tempo de ocorrência do defeito.

Já Makis (2008) utilizou o conceito de quantidade econômica de fabricação (*economic manufacturing quantity* – EMQ) juntamente com deterioração randômica dos componentes para formular um modelo que buscasse o tamanho de lote ótimo assim como a programação ótima de inspeção considerando inspeção imperfeita. Enquanto que Chelbi, Ait-Kadi e Aloui (2008) buscaram otimizar a disponibilidade de um sistema monocomponente, que alterna entre tempos em operação e tempos ociosos, em que as falhas podem ser auto anunciadas ou não. No

caso em que não forem, elas são detectadas somente na inspeção que pode não ser executada de forma correta.

Kulkarni e Achenbach (2008) utilizaram simulação de Monte Carlo para quantificar os efeitos de inspeções imperfeitas em sistemas compostos por componentes da área de saúde que sofrem danos por fadiga. A probabilidade que exista uma grande rachadura que não tenha sido identificada na inspeção é a quantidade de interesse para o modelo.

Zhao, Miao e Zhang (2009) apresentaram um trabalho em que consideraram a possibilidade de um atraso na ação de reparo do componente. Para modelar o custo por ciclo de vida e o risco os autores utilizaram conceitos de probabilidades, processo estocástico e *delay-time*. A inspeção é não periódica e imperfeita, e o modelo foi construído para otimizar os intervalos entre inspeções e o atraso no reparo, simultaneamente.

Wang *et al.* (2011) propuseram um modelo para avaliar a disponibilidade de um sistema utilizando *delay-time* com manutenção imperfeita na inspeção e ação perfeita de correção da falha. Os autores fizeram uma simulação numérica para entender a influência da inspeção imperfeita na disponibilidade e para a validação do modelo, o que mostrou que a disponibilidade decresce com a manutenção imperfeita. Também utilizaram algoritmo genético para realizar as estimativas da máxima verossimilhança dos parâmetros de confiabilidade.

Orcesi e Frangopol (2011) desenvolveram um estudo para avaliar a vida útil de uma ponte de aço. Para tanto, as possibilidades de ações de manutenção foram colocadas nos nós de uma árvore de eventos, e, a cada vez que um componente da ponte for inspecionado, decisões diferentes podem ser tomadas. A cada inspeção, os componentes estão sujeitos a incertezas, em que um defeito pode ser detectado ou não dependendo da qualidade da inspeção. A análise busca minimizar simultaneamente o custo esperado de manutenção e o custo esperado da falha.

De acordo com os autores Cai e Zhu (2011) o seu trabalho traz uma inovação na modelagem de um sistema de uma aeronave em que a inspeção é imperfeita, e o horizonte de tempo seja finito. Eles utilizaram um processo de Poisson não homogêneo para encontrar as probabilidades de renovação devido defeitos e falhas entre duas inspeções consecutivas, e um algoritmo com base no método simplex é utilizado para resolver o modelo.

Lin, Chen e Chen (2011) desenvolveram um modelo integrando o dimensionamento de lotes de produção com manutenção e qualidade, considerando as possibilidades de erros na inspeção, na manutenção preventiva e com mínimo reparo em um sistema com taxas de falhas crescentes. Eles buscaram encontrar o intervalo ótimo entre inspeções, o número ótimo de inspeções e a quantidade de produção para minimizar o custo total.

Já Berrade (2012) apresentou um modelo para um sistema de um único componente para detectar falhas que permanecem ocultas, com a possibilidade de que os testes realizados na inspeção não sejam perfeitos, falhando em encontrar um defeito ou ser um alarme falso. Um cronograma de inspeções de duas fases, proposto pela autora, leva em conta as mudanças no envelhecimento do componente, em que a frequência das inspeções pode ser diferente para detectar falhas precoces ou devido a deterioração natural do sistema com o passar do tempo.

Um modelo específico avaliando conjuntamente as ações de manutenção e o processo de corrosão causado por cloro em estruturas metálicas foi proposto por Bastidas-Arteaga e Schoefs (2012). Nesse modelo são combinadas a avaliação da penetração de cloretos nas estruturas, processos de Markov e teoria da decisão, em que existem incertezas na realização da inspeção, nas propriedades do material e nas ações ambientais, sendo o objetivo a minimização dos custos totais.

Berrade, Cavalcante e Scarf (2012) utilizaram os conceitos de falso positivo e falso negativo para avaliar a manutenção em dois modelos: quando não ocorre renovação em um falso positivo, e quando ocorre a renovação, para um sistema de proteção de uma indústria de bebidas. Posteriormente, Berrade *et al.* (2013) desenvolveram um modelo para um componente de proteção, em que há probabilidades de ocorrência de falso positivo e falso negativo, de maneira que o sistema é reparado quando a inspeção for um positivo ou em um certo tempo estabelecido, avaliando os custos envolvidos assim como desenvolvendo a função de confiabilidade para esse sistema.

Le e Tan (2013) afirmam ser a utilização de um sistema multiestado para desenvolver um modelo de manutenção que leve em conta a manutenção e a inspeção imperfeita, em que cada estado representa um nível de degradação do sistema a maior contribuição do estudo produzido por eles. Enquanto que Sahraoui, Khelif e Chateauneuf (2013) propuseram um modelo de manutenção aplicado para gasodutos submetidos à corrosão levando em conta os resultados de uma inspeção imperfeita, buscando otimizar o custo de manutenção, modelo este que em Sahraoui, Chateauneuf e Khelif (2017) foi atualizado para avaliar especialmente o efeito residual do *stress* dos gasodutos. Wang *et al.* (2015) também propuseram avaliar a corrosão considerando inspeções imperfeitas em gasodutos, neste caso, eles utilizaram simulação de Monte Carlo para avaliar uma distribuição de probabilidade para as inspeções imperfeitas.

Utilizando a integração entre a produção e a manutenção Hsu e Hsu (2013) desenvolveram dois modelos considerando que além das inspeções imperfeitas podem ocorrer falhas aleatórias na produção, resultando em itens defeituosos, de maneira que o objetivo é

encontrar a melhor quantidade de produção. Já Ye, Chen e Tsui (2015) propuseram avaliar, através da utilização do processo de *Winner* com erros, a degradação com taxas heterogêneas através de um algoritmo de filtragem que estima recursivamente a distribuição conjunta da taxa de degradação e os níveis atuais de degradação.

A respeito da ideia de falso positivo e falso negativo Flage (2014) desenvolveu um modelo no qual além de manutenção imperfeita foi considerado que poderiam ocorrer induções de falhas no processo na execução de uma inspeção periódica de um sistema composto por três estágios. O sistema é substituído antes da chegada do defeito preventivamente através da substituição por idade ou por um falso positivo e corretivamente pela indução de um defeito, e pode ser substituído após a chegada de uma falha preventivamente através da substituição por idade ou por uma detecção de defeito na inspeção e corretivamente por uma indução de falha ou por falha interna.

No trabalho de He, Maillart e Prokopyev (2015) foi considerado um sistema com falhas ocultas sujeito a manutenção preventiva e inspeções periódicas que podem ser imperfeitas, as quais geram um custo de penalidade por unidade de tempo não detectado. O objetivo do modelo é determinar a frequência e a quantidade ótima de inspeções para que o custo esperado por unidade de tempo seja minimizado em um horizonte de tempo finito. O modelo apresentado por Faddoul *et al.* (2015) possui o mesmo objetivo, porém os autores utilizaram matrizes para desenvolvê-lo, em que o processo de decisão de Markov é avaliado na área de construção civil, utilizando probabilidades de que a inspeção seja realizada de diferentes formas e que possa ser imperfeita.

O modelo desenvolvido por Mohammadi *et al.* (2015) considerou ambos os estados: em controle e fora de controle dos componentes, os quais são produzidos através de taxas diferentes, pertencentes a um sistema de produção sujeito a degradação e inspeção imperfeita. Os autores desenvolveram um modelo matemático para determinar o ótimo período de produção e a melhor política de inspeção que minimize o custo total esperado. Uma novidade apresentada por eles é que itens defeituosos podem ser encontrados em dois estágios: detecção no processo de inspeção e detecção pelos clientes.

Já Raza e Ulansky (2015) utilizaram a inspeção imperfeita para modelar um sistema com deterioração estocasticamente contínua, no qual seu estado é monitorado por um parâmetro que fornece informações acerca do componente. O monitoramento desse parâmetro pode ser imperfeito, fazendo com que a avaliação seja feita erroneamente, uma vez que quando a avaliação desse parâmetro excede um determinado valor, uma ação corretiva ou substituição

precisa ser realizada, sendo que o modelo busca identificar os limites ótimos para substituição. Enquanto que Moura *et al.* (2015) utilizaram o fato de que o parâmetro que mede a corrosão de sistemas pode não ser avaliado corretamente, expressando um valor diferente do que acontece na realidade.

Yang, Ma e Zhao (2016) avaliaram um sistema baseado em missão em que as missões têm duração randômica. Para o modelo que considera inspeção imperfeita, existe uma probabilidade fixa de que nas inspeções periódicas um defeito não seja identificado, e existem três casos possíveis de renovação do sistema: na falha, em uma inspeção randômica ou em uma inspeção periódica. Eles evidenciaram que o custo de manutenção em inspeções perfeitas é muito menor do que quando há inspeção imperfeita, evidenciando a necessidade de realizar inspeções com qualidade.

Ao passo que Sarkar e Saren (2016), também analisando um sistema de produção, avaliam o maquinário que passa de um estado sob controle para fora de controle a qualquer momento no tempo aleatoriamente. Os itens com defeito são detectados pela inspeção e precisam ser corrigidos a um determinado custo adicional, sendo que um item com defeito pode não ser identificado e chegar ao consumidor com esse problema. Os autores incluíram no modelo a avaliação da garantia dos produtos, sendo minimizado o custo total do item obtido pela busca do tamanho do lote de produção e da fração não inspecionada do lote. Já Zhou, Zhang e Lin (2017) utilizam a mesma visão de sistema, porém consideraram produzir um lote apenas com os produtos defeituosos e vender este posteriormente por um valor mais baixo.

Driessen, Peng e van Houtum (2017) utilizaram probabilidades não constantes para representar a ocorrência de inspeções imperfeitas durante a operação do sistema, buscando minimizar o custo médio em um tempo finito. Suas conclusões quando comparado a modelos que utilizam probabilidades constantes é que estes produzem custos em média 19% mais altos que o modelo desenvolvido por eles.

Assim como alguns autores apresentados anteriormente, Sett, Sarkar e Sarkar (2017), desenvolveram um modelo que considera a produção de itens que passa de um estado sob controle para um estado de fora de controle, em que inspeções imperfeitas são realizadas nos produtos e erros nestes não são encontrados. O objetivo do artigo deles é obter um estoque ótimo e uma política de inspeção com manutenção preventiva considerando dois tipos de erros de inspeção. Em que, para detectar os itens com defeito, outra inspeção humana é considerada no final do ciclo de produção.

Pietruczuk e Werbińska-Wojciechowska (2017) apresentaram um modelo que avalia um sistema com substituição em bloco, processo de falha regido por *delay-time*, e inspeção imperfeita para otimizar o custo de manutenção. Já Peng *et al.* (2017) avaliaram um sistema de componente único, o qual está sujeito a dois tipos de falhas: falha tradicional catastrófica e falha de dois estágios. O modelo busca otimizar o intervalo entre inspeções periódicas e o período para substituição preventiva através da minimização da taxa de custo a longo prazo.

Shen e Cui (2017) consideraram um sistema sujeito a degradação contínua regido pelo processo Gama, considerando que possam acontecer inspeções imperfeitas e perfeitas. O objetivo do trabalho é encontrar o número máximo de inspeções imperfeitas antes de haver inspeções perfeitas, de maneira que o custo de longo prazo seja minimizado, considerando apenas manutenção corretiva.

Berrade, Scarf e Cavalcante (2017) avaliaram a possibilidade de postergação de substituição em um sistema de único componente quando esta não é realizada imediatamente após a identificação de um defeito em uma inspeção, verificando em quais situações a postergação seja efetiva em relação ao custo. Mahmoudi *et al.* (2017) apresentou um modelo cuja contribuição está no fato de analisar ao mesmo tempo múltiplos tipos de defeitos e múltiplos métodos de inspeção, utilizando programação não linear para modelar o problema. Foram propostos dois modelos, um que busca maximizar a confiabilidade do sistema e o segundo minimizar o tempo de *downtime*. Ambos autores utilizam o modelo de *delay-time*.

E Seyedhosseini, Moakedi e Shahanaghi (2018) analisaram um sistema multicomponente com dependência estocástica entre os componentes, no qual a falha de um deles é escondida e provoca choque em outro componente aumentando sua taxa de falhas. A inspeção, que é imperfeita, em alguns componentes abre a oportunidade para que outros sejam inspecionados, o objetivo do modelo é identificar o melhor intervalo de tempo entre as inspeções periódicas que minimize o custo total em um tempo finito.

3.3 Síntese conclusiva do capítulo

O presente capítulo apresentou uma revisão da literatura sobre os dois temas centrais para o desenvolvimento dos modelos da presente tese: manutenção oportuna e inspeção imperfeita. Corroborando com o que foi visto no capítulo anterior, observa-se que a otimização das ações de manutenção tem sido desenvolvida para melhorar a eficiência e segurança dos processos, especialmente na minimização dos custos envolvidos com a manutenabilidade dos sistemas, quando se trata de modelos que utilizam inspeção. Em sua maioria, os modelos apresentados

utilizaram a otimização do intervalo entre inspeções imperfeitas através da minimização da Taxa de Custo de manutenção.

Sobre a manutenção oportuna, muitos trabalhos desenvolveram a solução do problema através da utilização de algoritmos genéticos, enquanto que os que trabalharam com inspeção imperfeita tem uma grande variação no algoritmo utilizado para encontrar a solução do problema, tais como utilização da simulação, processo de decisão de Markov, programação não-linear, desenvolvimento de modelos analíticos baseados em probabilidades, entre outros.

Também foi possível observar que diversos trabalhos utilizam simulação para conseguir encontrar os resultados ótimos dos problemas. Isso pode ser creditado ao fato de que a medida que os modelos incorporam mais características da realidade eles tendem a ser mais complexos, dificultando o desenvolvimento de modelos analíticos. Os autores que utilizam resolução analítica acabam realizando mais aproximações e adaptações para conseguir desenvolver resultados melhores.

Quanto à aplicabilidade dos modelos, alguns são desenvolvidos para resolução de um problema de um sistema específico, enquanto outros aplicam o modelo desenvolvido através de um estudo de caso. Em suma, a maioria dos modelos são aplicados de alguma forma a sistema reais para que os resultados obtidos sejam validados. A partir dos anos 2000 pode-se evidenciar uma grande aplicação de modelos de manutenção oportuna para parques eólicos tanto *offshore* quanto *onshore*.

Em relação à inspeção imperfeita pode-se verificar que os trabalhos se dividem de duas formas: os que consideram uma probabilidade de que a inspeção seja realizada corretamente, enquanto outros utilizam o conceito de falso positivo e falso negativo, em que mais de uma probabilidade precisa ser estipulada. Tal situação é utilizada devido as características dos sistemas que são analisados, de maneira que, em alguns casos é possível detectar apenas que um erro ocorreu, enquanto em outros casos, qual tipo de erro é esse.

É possível verificar então, que existe uma lacuna na produção de trabalhos que unam os dois temas apresentados, manutenção oportuna e inspeção imperfeita. Além do mais, a utilização de metodologias que agregam vários critérios em uma mesma avaliação, também são escassos na área analisada. Esses fatos tornam a presente pesquisa um passo importante na modelagem de sistemas sujeitos a manutenção oportuna em que possam haver problemas na realização de inspeções.

A utilização da possibilidade de ocorrência de erros na inspeção torna os modelos mais realistas, uma vez que isso é um fato que se observa nos sistemas. Além disso, a utilização do

aproveitamento do surgimento de oportunidade de manutenção pode fornecer vantagem ao sistema em termos de custo de manutenção e em termos de disponibilidade do sistema, enquanto que a consideração de ambos para a construção de um modelo de apoio à decisão multicritério pode incluir a visão de pessoas especialistas no processo e de aspectos subjetivos, o que pode tornar o sistema mais realista.

4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE MANUTENÇÃO BASEADO EM OPORTUNIDADE, CONSIDERANDO INSPEÇÃO IMPERFEITA

O presente capítulo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento do modelo analítico de manutenção, mostrando as características do componente envolvido, as características da política de manutenção utilizada, bem como expor as equações que foram desenvolvidas. Essas equações serão utilizadas para calcular a taxa de custo de manutenção esperada o qual deve ser minimizado, assim como serão utilizadas para calcular o tempo médio entre falhas operacionais.

Além disso, apresentará uma aplicação numérica para o modelo com o intuito de proporcionar melhor entendimento e fazer testes de consistência do mesmo, na qual serão definidos os valores para os parâmetros do modelo, tais como os de custo de manutenção (preventiva, preventiva oportuna, corretiva e de inspeção), do processo de chegada de falhas, de oportunidade e de defeito, entre outros. Algumas comparações serão realizadas a fim de investigar como a presença de erros na inspeção pode afetar os resultados.

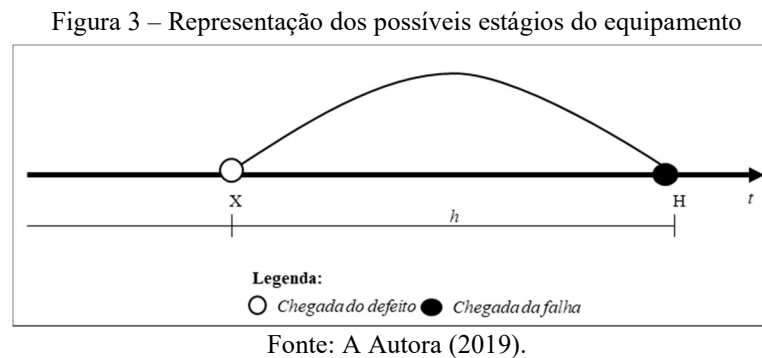
Em seguida uma proposta de modificação para o modelo original é desenvolvida, a qual é chamada de modelo sem renovação do sistema em falso positivo, em que se considera que o componente não será substituído em um falso positivo, incorrendo em uma penalidade em termos de custo, o qual também será alvo de uma aplicação numérica. Posteriormente serão apresentados alguns comentários sobre os resultados e comparações entre os modelos desenvolvidos.

4.1 Descrição das características do sistema e da manutenção

O modelo apresentado a seguir é caracterizado por considerar um componente ou dispositivo para manutenção, porém existem duas situações que são válidas. A primeira é que o componente seja parte de um sistema complexo, composto por vários componentes, e que não possua qualquer tipo de dependência. Dessa forma, os outros dispositivos do sistema fornecem a oportunidade para substituição, seja por parada devido a falha ou por substituição programada. A outra situação é quando se trata de um sistema simples, composto por apenas um componente que esteja sujeito a eventos que possam ser caracterizados como oportunidade para realizar a substituição.

Quanto aos estágios que o componente pode visitar, considera-se que existam três. O primeiro é dito como bom, quando, a partir do momento zero, o componente está funcionando

perfeitamente sem apresentar nenhum defeito. O segundo é quando o sistema apresenta um estado defeituoso, ou seja, o componente está funcionando, mas não com seu melhor desempenho, conforme a Figura 3 o defeito chega ao equipamento no ponto X. Ambos os estados anteriormente citados são revelados através de uma inspeção. O terceiro é o estado falho, em que há ocorrência de uma falha e o equipamento para de funcionar, sendo a falha imediatamente revelada, conforme ponto H da Figura 1.

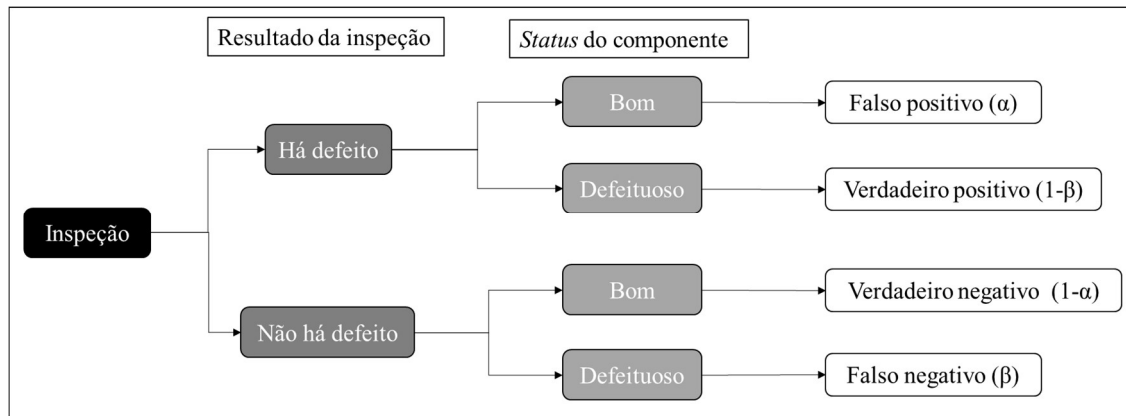


O tempo para a chegada do defeito é uma variável aleatória X , representada por uma função densidade de probabilidade $f_X(X)$ e uma função de probabilidade acumulada $F_X(X)$. Após a chegada do defeito, existe um intervalo de tempo para a ocorrência da falha, o qual é chamado de *delay-time*, representado pela variável aleatória H , com função densidade de probabilidade $f_H(H)$ e função de probabilidade acumulada $F_H(H)$. X e H são variáveis independentes entre si.

A verificação do estado do componente é realizada através de inspeções periódicas em $i\Delta$ unidades de tempo, $i = 1, \dots, K - 1$. Se o componente for detectado como defeituoso, ele será renovado através de uma substituição. Se o componente resistir até a idade $K\Delta$, ele será renovado mediante uma substituição preventiva.

As inspeções são imperfeitas, ou seja, podem ocorrer erros na sua execução. Pode acontecer o fato de o componente estar em estado defeituoso, mas no momento da inspeção, o componente seja identificado como bom (falso negativo), enquanto que também pode ocorrer o inverso, o componente estar em estado bom, mas na inspeção ser identificado como defeituoso (falso positivo). A cada uma dessas situações é associada uma probabilidade, conforme é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Representação do status do componente em uma inspeção.



Fonte: A Autora (2019).

Essas situações podem ser provenientes de equívocos na utilização de equipamentos que detectam a presença de defeitos no componente, tais como variação na temperatura, ruído, vibração, entre outros, ou mesmo devido à descalibragem desse equipamento. Podem também ocorrer em situações em que não se utilizam equipamentos e a verificação é visual, dependendo da capacidade de quem está realizando a inspeção em detectar ou não o defeito.

Pode haver dificuldade na definição das probabilidades α e β . Uma forma de definir a probabilidade de ocorrência de falso positivo é a empresa, quando fizer a substituição do componente, enviar para a fabricante do componente para uma checagem, e ao atestar que o componente está bom, entender que o componente foi substituído em um falso positivo. E o quantitativo de vezes que tal situação foi verificada em um total de vezes, pode fornecer a probabilidade.

Porém o falso negativo não é tão fácil de ser identificado. Como será verificada na aplicação numérica do presente capítulo, a não consideração de que ele possa ocorrer é prejudicial em termos de custo e de intervalo médio entre as falhas. O que faz com que a consideração da probabilidade de ocorrência do falso negativo seja considerada.

O presente modelo utiliza manutenção oportuna, em que uma combinação de ações de manutenção preventiva e corretiva é empregada para desenvolver a política de manutenção. O sistema pode ter falhado por alguns motivos, dentre eles, a falha em um outro equipamento/componente, a correção de um defeito de um outro componente/equipamento para a qual é necessário parar o sistema para a sua correção, ou a parada do sistema devido a eventos externos, como a falta de demanda ou a falta de *inputs* para o processo. Isto é, se o sistema parar devido a algum desses acontecimentos, pode-se realizar a manutenção preventiva no componente analisado. Entretanto, é necessário frisar que o componente o qual será analisado

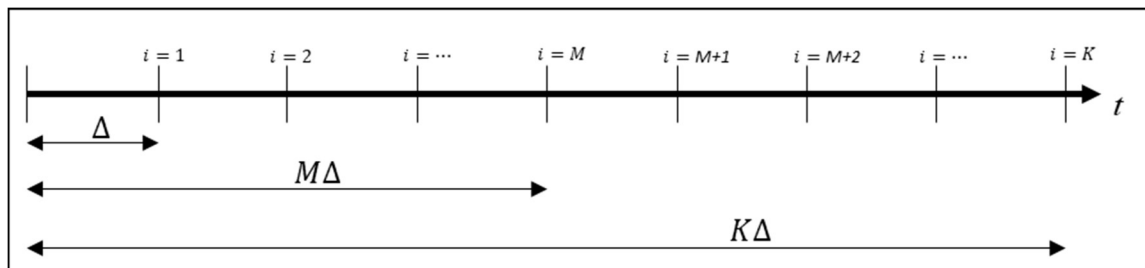
é estocasticamente independente dos outros componentes/equipamentos do sistema, assim o seu processo de falha é independente do restante deste.

Oportunidades surgem a todo o momento dentro dos sistemas, contudo, o principal problema reside na possibilidade de, se a manutenção baseada em oportunidades não for programada ou prevista na política de manutenção, ela não será utilizada da melhor forma. Partindo desse pressuposto, os modelos dessa tese se propõem a utilizar a chegada de oportunidades para manutenção, com o intuito de proporcionar redução de custos de manutenção e aumento de confiabilidade para o sistema.

Não obstante, é possível que as oportunidades surjam em intervalos de tempo curtos, podendo realizar trocas frequentes e desnecessárias no componente. Em contrapartida, o inverso também pode acontecer: as oportunidades que ocorrem em intervalos de tempo muito grandes, não sendo aproveitadas para a substituição oportuna. Nesse sentido, um limiar de idade para o componente é estabelecido ($M\Delta$) para que se considere apenas a oportunidade de ocorrer, a qualquer tempo, após esse limite, e ele sobrevivendo até então será substituído preventivamente. Tal abordagem foi proposta por Cavalcante, Lopes e Scarf (2018), porém os autores não avaliaram a possibilidade de ocorrência de erros na execução das inspeções.

Dessa maneira, o modelo possui como variáveis de decisão Δ , M , K , conforme representado pela Figura 5. A definição das variáveis de decisão do modelo terá seus valores otimizados a partir das características específicas do sistema ao qual se está aplicado o modelo, tais como taxa de falhas, taxa de chegada de oportunidade, *delay-time*, entre outros, que se tratam dos *inputs* para o modelo.

Figura 5 – Representação das variáveis de decisão do modelo.



Fonte: A Autora (2019).

Além disso, considera-se que na substituição do componente ele seja restaurado para a condição de tão bom quanto novo. Isto é, a idade do componente retorna a zero e, por isso, o tempo inicial para análise é igual a zero e, assim, pode-se dizer que o ciclo se reinicia a cada

substituição do componente, seja em uma falha, em uma oportunidade ou em uma manutenção preventiva.

Nessa perspectiva, o componente poderá ser renovado em:

- uma inspeção, quando o componente for detectado como defeituoso;
- uma falha;
- uma oportunidade, quando ela acontecer a qualquer tempo após MA ;
- KA , se o componente sobreviver até essa idade.

4.2 Modelagem utilizando modelo simulado e modelo analítico

Antes de apresentar o desenvolvimento dos modelos que são focos desse trabalho, será traçado um paralelo entre modelo analítico e modelo simulado para a manutenção. Como fonte de informação para tal paralelo, será utilizado o modelo desenvolvido por Marsaro e Cavalcante (2017) intitulado como “*Random preventive maintenance policy based on inspection for a multicomponent system using simulation*”.

De acordo com os autores, devido à complexidade dos sistemas multicomponentes, o desenvolvimento de modelos analíticos se torna uma atividade difícil em que uma maior quantidade de simplificações precisa ser realizada quando comparados aos modelos simulados. Dessa forma, a medida que os sistemas se tornam mais complexos, mais variáveis são levadas em conta, e, por muitas vezes, pode não se saber ao certo seu comportamento, sendo indicado então, a modelagem através de simulação. Por outro lado, os modelos analíticos podem apresentar resultados mais precisos, apesar da possibilidade de ser necessário realizar mais adaptações para conseguir executar a modelagem.

O Quadro 1 apresenta as principais características dos sistemas utilizados na modelagem do artigo supracitado e da modelagem do presente capítulo dessa tese, com o intuito de proporcionar alguns comparativos.

A partir do Quadro 1, é possível identificar os motivos que levaram à utilização de duas formas de modelagens distintas para o modelo do artigo e para o modelo da tese, principalmente devido às três primeiras características que diferem os modelos. Dessa forma, por se ter um sistema multicomponente, em que a inspeção do componente B está atrelada a detecção de uma falha no componente A, o que torna essas inspeções não periódicas, além de não se considerar um limite de tempo para a vida dos componentes, acabou-se escolhendo a utilização de um modelo simulado.

Quadro 1 – Comparativo entre as características do modelo simulado e modelo analítico.

Diferenças		Similaridades
Modelo simulado	Modelo analítico	
Sistema multicomponente (considera dois componentes A e B).	Sistema monocomponente.	Utilizam oportunidades dos componentes para realizar ações.
Cada um dos componentes possui um tipo de inspeção, em A é periódica e em B não periódica.	Inspeções periódicas.	Consideram o modelo de <i>delay-time</i> para o comportamento das falhas, porém no modelo simulado apenas para o componente B.
Não é estabelecido um limite para substituição preventiva do sistema (limite de vida).	É estabelecido um limite de vida para o componente para a substituição preventiva.	Os custos de inspeção e substituição são conhecidos.
A oportunidade gerada por A é considerada para inspecionar o componente B.	A oportunidade é considerada para realizar uma substituição preventiva.	Calculam a taxa de custo por unidade de tempo.
O componente A possui <i>hidden failure</i> , identificada apenas com inspeção.	A falha é verificada logo na sua ocorrência.	
Utiliza um limite de tempo, baseado no número de inspeções realizadas no Componente B.	Calcula um limite de tempo para considerar a chegada de oportunidade.	
Inspeções perfeitas	Inspeções imperfeitas	

Fonte: A Autora (2019).

Em contrapartida, valendo-se do fato de que as inspeções ocorram em mesmos intervalos de tempo, que o componente não possua nenhum tipo de dependência aos demais componentes, e que há um limite de vida para esse componente, um modelo analítico passa ser uma boa forma de modelagem. Uma vantagem da utilização desse modelo analítico é a possibilidade de checagem, na qual a soma das probabilidades de finalização do ciclo deve ser igual a um, permitindo uma maior acurácia nos cálculos.

Vale ressaltar que para o desenvolvimento do modelo simulado não são necessárias as equações para o cálculo da taxa de custo de manutenção por unidade de tempo. O cálculo é baseado em comandos em algum *software* de cálculo para verificar algumas condições que são atribuídas aleatoriamente para as variáveis consideradas. Para o modelo analítico, por sua vez, é necessário desenvolver as equações que calculam as medidas de interesse, um procedimento mais demorado para a elaboração, mas que para execução pode ser mais rápido.

Sendo assim, é necessário que o modelo simulado seja executado diversas vezes, para que os resultados possam ser estabilizados e se possa considerar os resultados por ele produzidos, o que pode torná-lo mais demorado para obtenção dos resultados ótimos, procedimento o que não é necessário para o modelo analítico.

4.3 Modelagem da política de manutenção através de modelo analítico

A partir das características apresentadas anteriormente é possível apresentar o desenvolvimento das equações que representam o modelo de manutenção, de maneira que sejam calculadas a taxa de custo esperado por unidade de tempo e o intervalo médio entre falhas operacionais (MTBOF – *Mean Time Between Operational Failure*).

Para iniciar o processo de modelagem, serão indicados os possíveis cenários de renovação, os quais levam em conta as possíveis maneiras de renovar o componente, assim como a ocorrência dos erros na inspeção e da chegada da oportunidade. Assim os possíveis cenários são, renovação do componente:

1. em uma inspeção até $M\Delta$, devido um verdadeiro positivo;
2. em uma inspeção depois de $M\Delta$, devido um verdadeiro positivo;
3. em uma inspeção até $M\Delta$, devido um falso positivo;
4. em uma inspeção depois de $M\Delta$, devido um falso positivo;
5. em uma falha até $M\Delta$, após verdadeiro negativo;
6. em uma falha depois $M\Delta$, após verdadeiro negativo;
7. em uma falha até $M\Delta$, após falso negativo;
8. em uma falha depois $M\Delta$, após falso negativo;
9. em uma oportunidade, após verdadeiro negativo, estando o componente defeituoso;
10. em uma oportunidade, após verdadeiro negativo, estando o componente bom;
11. em uma oportunidade, após falso negativo;
12. no limite de vida estabelecido para o componente, com o componente defeituoso;
13. no limite de vida estabelecido para o componente, com o componente bom.

A construção desses cenários exaure todas as possibilidades de acontecimentos em um ciclo de vida do componente, dentre elas a chegada da falha, do defeito e da oportunidade. Tal fato é necessário para que a soma da probabilidade de ocorrência dos cenários seja igual a 1, confirmando que todas as possibilidades estão exauridas. Assim, não há possibilidade de que um cenário de renovação não tenha sido considerado no modelo, mas, a depender da aplicação a qual ele esteja sujeito, pode haver possibilidade de que um cenário não aconteça.

A análise desses cenários dá o suporte para o cálculo da taxa de custo de manutenção por unidade de tempo e o MTBOF. As equações para o cálculo de ambos são apresentadas após a explanação sobre cada um dos cenários. O Quadro 2 apresenta as siglas que serão utilizadas

para a construção das equações referentes a cada uma das possibilidades de renovação do sistema.

É importante destacar que, no último período, ou seja, quando $i=K$, o componente não será inspecionado, uma vez que já há uma substituição programada para o limite de vida do componente, não necessitando realizar a ação de inspeção.

Quadro 2 – Siglas utilizadas no modelo de minimização da taxa de custo.

Siglas	Significado
Δ	Tempo entre inspeções
M	Número mínimo de inspeções para considerar a chegada de oportunidade
K	Número máximo de inspeções em um ciclo
β	Probabilidade de um falso negativo
α	Probabilidade de um falso positivo
$f_x(.)$	Função densidade de probabilidade da chegada do defeito
$f_h(.)$	Função densidade de probabilidade do <i>delay-time</i>
$f_z(.)$	Função densidade de probabilidade da oportunidade
$F_x(.)$	Função distribuição acumulada da chegada do defeito
$F_h(.)$	Função distribuição acumulada do <i>delay-time</i>
$F_z(.)$	Função distribuição acumulada da oportunidade
x	Tempo para chegada do defeito
h	<i>Delay-time</i>
z	Tempo para chegada da oportunidade
i	Localizador da inspeção
j	Localizador do defeito
b	Número de Cenários
C_i	Custo de realizar uma inspeção
C_p	Custo de realizar uma substituição preventiva em uma inspeção ou no fim do ciclo de vida do componente
C_o	Custo de realizar uma substituição em uma oportunidade
C_f	Custo de realizar uma substituição em uma falha
C_n	Custo esperado para o cenário analisado
P_n	Probabilidade de ocorrência do cenário analisado
L_n	Tamanho esperado do ciclo para o cenário analisado

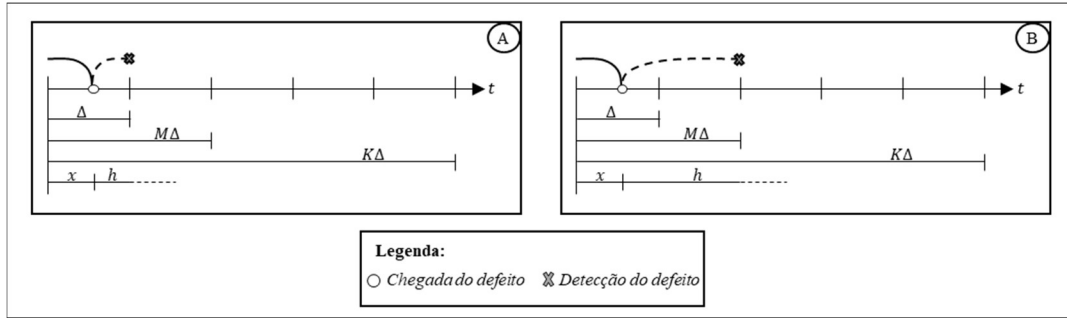
Fonte: A Autora (2019).

Cenário 1: Renovação do componente em uma inspeção até $M\Delta$, devido um verdadeiro positivo.

Considera-se que a substituição do componente será realizada em uma inspeção estando o componente em estado defeituoso, levando em conta apenas as inspeções que ocorrem até $M\Delta$. A divisão entre substituições relacionadas a M é necessária, pois as que ocorrem depois estão relacionadas com a chegada ou não de oportunidade, o que leva a algumas modificações nas equações, conforme serão vistas em todos os casos.

A Figura 6 representa as possíveis finalizações do ciclo para esse cenário, em que, em A, não teria a ocorrência de falso negativo durante o ciclo, enquanto em B poderia ocorrer, ou seja, o defeito ocorreu antes da inspeção anterior, e ele não foi detectado, ocasionando pelo menos um falso negativo.

Figura 6 – Representação da renovação do componente em uma inspeção antes de $M\Delta$, devido um verdadeiro positivo.



Fonte: A Autora (2019).

Para o cálculo do custo de manutenção esperado de todas as possíveis renovações mediante uma inspeção (Cenários 1, 2, 3 e 4), leva-se em conta o custo de cada uma das inspeções realizadas (C_i) e o custo de substituição do componente preventivamente em uma inspeção (C_p). Em contrapartida, para o cálculo do tamanho do ciclo, leva-se em conta a quantidade de inspeções realizadas e o tempo transcorrido entre inspeções (Δ).

A partir disso, é possível, então, definir as equações para o cálculo da probabilidade de que o ciclo acabe nas condições apresentadas (Equação 4.1), do custo de manutenção se o ciclo acabar em uma inspeção até $M\Delta$ (Equação 4.2), e do tamanho esperado para o ciclo (Equação 4.3), para o Cenário 1. Se M for igual a zero, esse cenário não existirá, uma vez que não ocorreriam inspeções até o limite M , assim como quando $M=K=1$, em que o componente seria renovado no ciclo de vida.

$$P_1(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=1}^M P_{li}(\Delta, M, i) & \text{se } M \geq 1, K > M \\ \sum_{i=1}^{M-1} P_{li}(\Delta, M, i) & \text{se } M \geq 2, K = M \end{cases} \quad (1)$$

$$C_1(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=1}^M [(iC_i + C_p) P_{li}(\Delta, M, i)] & \text{se } M \geq 1, K > M \\ \sum_{i=1}^{M-1} [(iC_i + C_p) P_{li}(\Delta, M, i)] & \text{se } M \geq 2, K = M \end{cases} \quad (2)$$

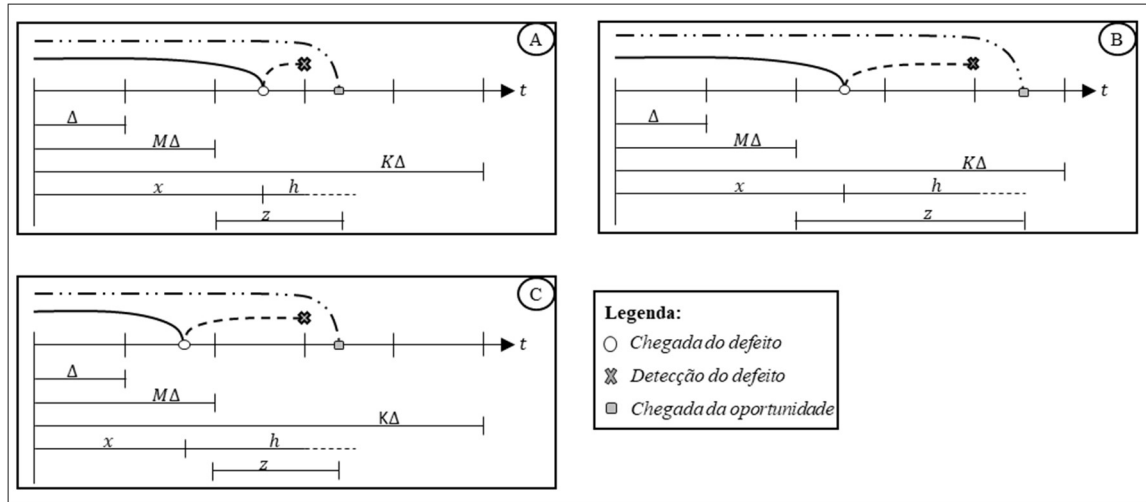
$$L_1(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=1}^M [(i\Delta) P_{li}(\Delta, M, i)] & \text{se } M \geq 1, K > M \\ \sum_{i=1}^{M-1} [(i\Delta) P_{li}(\Delta, M, i)] & \text{se } M \geq 2, K = M \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Onde } P_{li}(\Delta, M, i) = \sum_{j=1}^i \left[(1-\alpha)^{j-1} \beta^{i-j} (1-\beta) \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{i\Delta-x}^{\infty} f_H(h) dh dx \right] \quad (4)$$

Cenário 2: Renovação do componente em uma inspeção depois de $M\Delta$, devido um verdadeiro positivo.

As características desse cenário são semelhantes às do Cenário 1, porém a inspeção ocorre após o limite $M\Delta$. Dessa maneira, conforme apresenta a Figura 7, existem três possíveis situações que são: A) O defeito chega no componente após $M\Delta$ e é detectado na inspeção subsequente; B) O defeito chega no componente após o limite $M\Delta$ e é identificado em inspeção posterior, ocorrendo falso negativo; e C) o defeito chega no componente antes do limite $M\Delta$, porém é identificado após, ou seja, ocorreu falso negativo. Para todas as situações o componente é renovado na inspeção.

Figura 7 – Representação da renovação do componente em uma inspeção depois de $M\Delta$, devido um verdadeiro positivo



Fonte: A Autora (2019).

Assim, considerando que $K > M+1$, $K \geq 2$, $M \geq 0$ e o cenário apresentado acima, pode-se calcular a probabilidade de que o ciclo termine em uma inspeção, devido um verdadeiro positivo depois de $M\Delta$ (Equação 4.5), o custo de manutenção esperado para o ciclo (Equação 4.6), e o tamanho esperado do ciclo (Equação 4.7), para o Cenário 2, conforme segue.

$$P_2(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^{K-1} P_{2i}(\Delta, M, K, i) \quad (5)$$

$$C_2(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^{K-1} [(iC_i + C_p) P_{2i}(\Delta, M, K, i)] \quad (6)$$

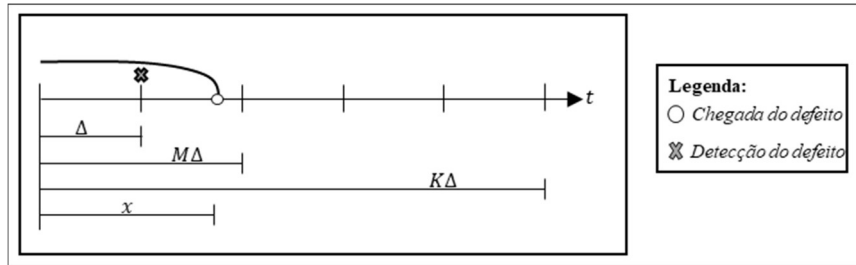
$$L_2(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^{K-1} [(i\Delta) P_{2i}(\Delta, M, K, i)] \quad (7)$$

$$\text{Onde } P_{2i}(\Delta, M, K, i) = \sum_{j=1}^i \left[(1-\alpha)^{j-1} \beta^{i-j} (1-\beta) [1 - F_Z((i-M)\Delta)] \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_x(x) \int_{i\Delta-x}^{\infty} f_H(h) dh dx \right] \quad (8)$$

Cenário 3: Renovação do componente em uma inspeção até $M\Delta$, devido um falso positivo.

Este cenário também representa uma possibilidade de renovação através de uma inspeção, no entanto como resultado de um falso positivo. Nesse caso, o componente está bom, mas em uma inspeção é dito que o componente está em estado defeituoso, devido algum erro na detecção. Isso pode ser verificado na Figura 8, na qual se analisa o acontecido antes do limite $M\Delta$.

Figura 8 – Representação da renovação do componente em uma inspeção antes de $M\Delta$, devido um falso positivo.



Fonte: A Autora (2019).

Nesse sentido, levando em consideração o que foi descrito acima, é possível desenvolver os cálculos para a probabilidade de que o ciclo acabe através de um falso positivo em uma inspeção até $M\Delta$ (Equação 4.9), para o custo de manutenção esperado para o ciclo (Equação 4.10) e para o tamanho esperado do ciclo (Equação 4.11) para o Cenário 3. Esse cenário não existirá se $M=0$, então os cálculos não apresentam essa condição.

$$P_3(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=1}^M P_{3i}(\Delta, M, i) & \text{se } M \geq 1, K > M \\ \sum_{i=1}^{M-1} P_{3i}(\Delta, M, i) & \text{se } M \geq 2, K = M \end{cases} \quad (9)$$

$$C_3(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=1}^M [(iC_i + C_p) P_{3i}(\Delta, M, i)] & \text{se } M \geq 1, K > M \\ \sum_{i=1}^{M-1} [(iC_i + C_p) P_{3i}(\Delta, M, i)] & \text{se } M \geq 2, K = M \end{cases} \quad (10)$$

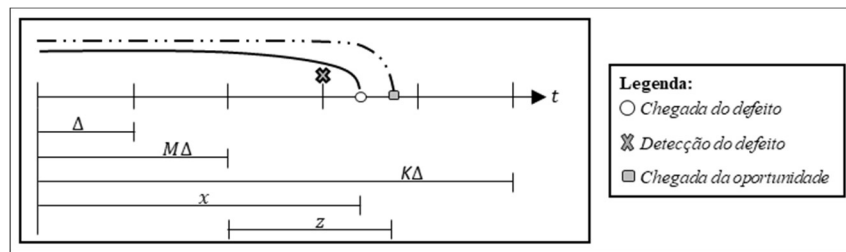
$$L_3(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=1}^M [(i\Delta) P_{3i}(\Delta, M, i)] & \text{se } M \geq 1, K > M \\ \sum_{i=1}^{M-1} [(i\Delta) P_{3i}(\Delta, M, i)] & \text{se } M \geq 2, K = M \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{Em que } P_{3i}(\Delta, M, i) = [(1 - \alpha)^{i-1} \alpha [1 - F_X(i\Delta)]] \quad (12)$$

Cenário 4: Renovação do componente em uma inspeção depois de $M\Delta$, devido um falso positivo.

Esse cenário trata da renovação do ciclo através de um falso positivo em uma inspeção, depois de $M\Delta$. Sendo assim, apesar de que o componente esteja bom a sua substituição é realizada, levando em consideração que a oportunidade não tenha acontecido antes dessa inspeção. Isso é representado pela Figura 9.

Figura 9 – Representação da renovação do componente em uma inspeção depois de $M\Delta$, devido um falso positivo.



Fonte: A Autora (2019).

Dessa maneira, considerando o apresentado acima e que $K \geq M+1$ e $M \geq 0$, pode-se calcular a probabilidade de que o ciclo acabe em um falso positivo depois de M (Equação 4.13), o custo esperado de manutenção (Equação 4.14), e o tamanho esperado do ciclo (Equação 4.15), para o Cenário 4.

$$P_4(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^{K-1} P_{4i}(\Delta, M, K, i) \quad (13)$$

$$C_4(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^{K-1} [(iC_i + C_p) P_{4i}(\Delta, M, K, i)] \quad (14)$$

$$L_4(\Delta, M, K, i) = \sum_{i=M+1}^{K-1} [(i\Delta) P_{4i}(\Delta, M, K, i)] \quad (15)$$

$$\text{Em que } P_{4i}(\Delta, M, K, i) = (1-\alpha)^{i-1} \alpha [1-F_Z((i-M)\Delta)] [1-F_X(i\Delta)] \quad (16)$$

Pode-se calcular a probabilidade, o custo de manutenção esperado e o tamanho do ciclo esperado, respectivamente, para a renovação do componente em uma inspeção.

$$P_{insp}(\Delta, M, K) = \sum_{b=1}^4 P_b(\Delta, M, K) \quad (17)$$

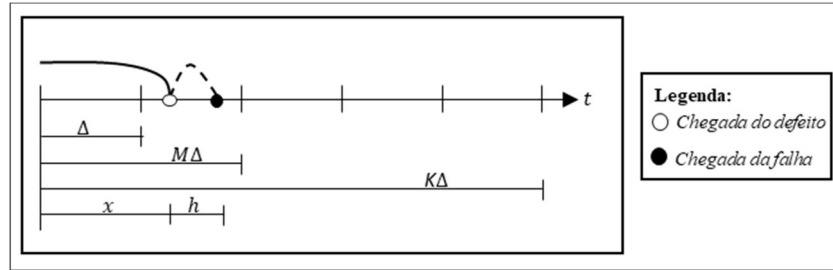
$$C_{insp}(\Delta, M, K) = \sum_{b=1}^4 C_b(\Delta, M, K) \quad (18)$$

$$L_{insp}(\Delta, M, K) = \sum_{b=1}^4 L_b(\Delta, M, K) \quad (19)$$

Cenário 5: Renovação do componente em uma falha até $M\Delta$, após verdadeiro negativo.

Este cenário representa a renovação do componente que está em estado de falha. Conforme apresenta a Figura 10, o defeito e a falha ocorrem em um mesmo intervalo entre inspeções, dessa forma, na inspeção anterior, o componente estava em estado bom, o que significa que a renovação ocorre após um verdadeiro negativo, sendo isso antes do limite $M\Delta$.

Figura 10 – Representação da renovação do componente em uma falha antes de $M\Delta$, após verdadeiro negativo.



Fonte: A Autora (2019).

Em relação aos custos de manutenção para os cenários em que a renovação é dada através de uma falha (Cenários 5, 6, 7 e 8) é preciso considerar os custos de se inspecionar o componente em todas as inspeções (C_i) e o custo para substituir o componente mediante uma falha (C_f), que é maior do que o custo da substituição preventiva. Já em relação ao tamanho do ciclo, este está relacionado ao tempo para a ocorrência da falha, a qual é a soma do tempo para ocorrência do defeito mais o *delay-time*.

Então, levando em consideração o que foi apresentado acima sobre o Cenário 5 e que $M \geq I, K \geq M, i = I, \dots, M$, pode-se calcular, utilizando as Equações a seguir, a probabilidade de que o ciclo acabe em uma falha, antes do limite $M\Delta$ e depois de um verdadeiro negativo (Equação 4.20), o custo de manutenção esperado (Equação 4.21) e o tamanho esperado do ciclo (Equação 4.23), para o Cenário 5.

$$P_5(\Delta, M, K) = \sum_{i=1}^M [P_{5i}(\Delta, M, i)] \quad (20)$$

$$C_5(\Delta, M, K) = \sum_{i=1}^M \left[((i-1)C_i + C_f) P_{5i}(\Delta, M, i) \right] \quad (21)$$

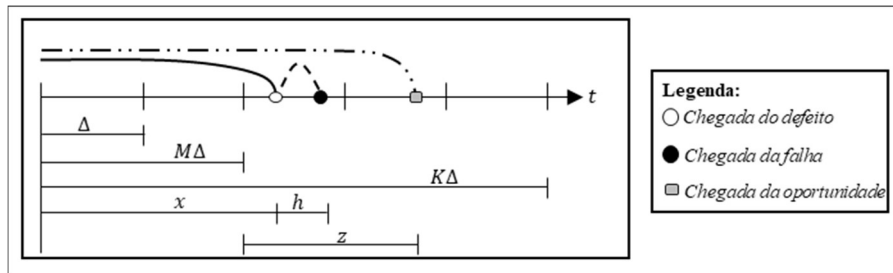
$$\text{Em que } P_{5i}(\Delta, M, i) = (1-\alpha)^{i-1} \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) \int_0^{i\Delta-x} f_H(h) dh dx \quad (22)$$

$$L_5(\Delta, M, K) = \sum_{i=1}^M \left[(1-\alpha)^{i-1} \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) \int_0^{i\Delta-x} (x+h) f_H(h) dh dx \right] \quad (23)$$

Cenário 6: Renovação do componente em uma falha depois de $M\Delta$, após verdadeiro negativo.

Tem-se que o defeito e a falha devem ocorrer em um mesmo intervalo entre inspeções, e que isso aconteça depois de $M\Delta$, além de considerar que a oportunidade não chegue antes da falha, conforme apresenta a Figura 11.

Figura 11 – Representação da renovação do componente em uma falha depois de $M\Delta$, após verdadeiro negativo.



Fonte: A Autora (2019).

É possível então, calcular a probabilidade de o ciclo acabar mediante uma falha após verdadeiro negativo depois de $M\Delta$ (Equação 4.24), o custo esperado de manutenção (Equação 4.25) e o tamanho do ciclo esperado (Equação 4.27), para o Cenário 6, considerando que $K > M$, $K \geq I, i > M$ e $M \geq 0$.

$$P_6(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K [P_{6i}(\Delta, M, K, i)] \quad (24)$$

$$C_6(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K \left[((i-1)C_i + C_f) P_{6i}(\Delta, M, K, i) \right] \quad (25)$$

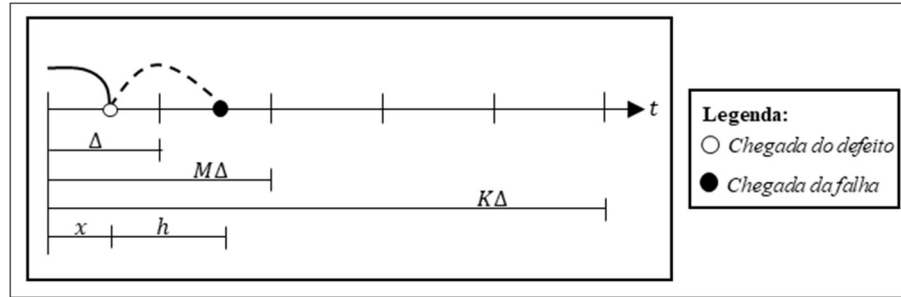
$$\text{Em que: } P_{6i}(\Delta, M, K, i) = (1-\alpha)^{i-1} \int_{(i-1)\Delta}^{\Delta} f_X(x) \int_0^{i\Delta-x} f_H(h) [1 - F_Z(x+h-M\Delta)] dh dx \quad (26)$$

$$L_6(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K \left[(1-\alpha)^{i-1} \int_{(i-1)\Delta}^{\Delta} f_X(x) \int_0^{i\Delta-x} (x+h) f_H(h) [1 - F_Z(x+h-M\Delta)] dh dx \right] \quad (27)$$

Cenário 7: Renovação do componente em uma falha até $M\Delta$, após falso negativo.

Tem-se também a renovação do componente mediante uma falha, porém após um falso negativo, ou seja, em inspeções anteriores o componente estava em estado defeituoso, mas não foi detectado, ocorrendo a falha antes da próxima inspeção. Tudo isso ocorrendo antes do limite $M\Delta$, o que é apresentado na Figura 12, para $i=2$.

Figura 12 – Representação da renovação do componente em uma falha antes de $M\Delta$, após falso negativo.



Fonte: A Autora (2019).

Assim, considerando o exposto e que $M \geq 2$, $K \geq M$, $i=2, \dots, M$, é possível calcular a probabilidade de que o ciclo acabe em uma falha, depois de ter ocorrido um falso negativo até o limite $M\Delta$ (Equação 4.28), o custo de manutenção esperado (Equação 4.29) e o tamanho esperado do ciclo (Equação 4.30), para o Cenário 7, conforme apresentam as Equações a seguir.

$$P_7(\Delta, M, K) = \sum_{i=2}^M P_{7i}(\Delta, M, K, i) \quad (28)$$

$$C_7(\Delta, M, K) = \sum_{i=2}^M \left[((i-1)C_i + C_f) P_{7i}(\Delta, M, K, i) \right] \quad (29)$$

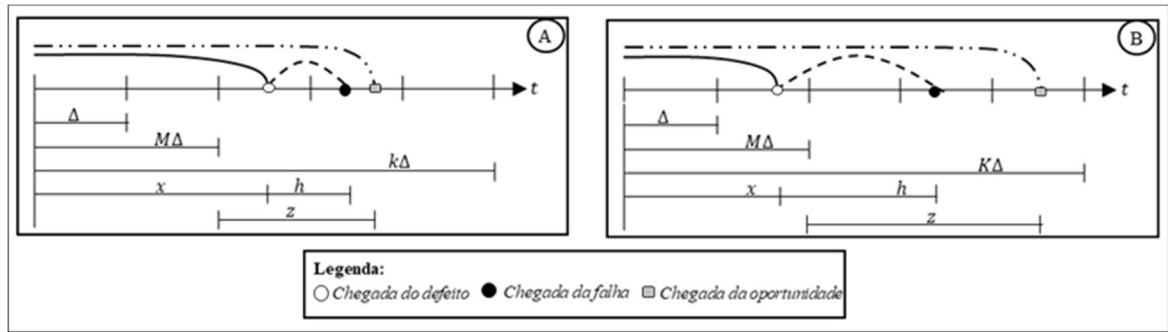
Em que $P_{7i}(\Delta, M, K, i) = \sum_{j=1}^{i-1} \left[(1-\alpha)^{j-1} \beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1)\Delta-x}^{i\Delta-x} f_H(h) dh dx \right]$ (30)

$$L_7(\Delta, M, K) = \sum_{i=2}^M \sum_{j=1}^{i-1} \left[(1-\alpha)^{j-1} \beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1)\Delta-x}^{i\Delta-x} (x+h) f_H(h) dh dx \right] \quad (31)$$

Cenário 8: Renovação do componente em uma falha depois de $M\Delta$, após falso negativo.

Esse cenário se assemelha ao Cenário 7, no qual a renovação do ciclo se dá pela ocorrência de uma falha, após um falso negativo, porém agora após o limite $M\Delta$. É preciso considerar que a oportunidade não tenha chegado ao componente antes que a falha para que esse cenário aconteça. Na Figura 13 esse cenário pode ser verificada de duas formas, em A quando o defeito ocorre após $M\Delta$ e em B, quando o defeito ocorre antes.

Figura 13 – Representação da renovação do componente em uma falha depois de $M\Delta$, após falso negativo.



Fonte: A Autora (2019).

Assim, considerando que $K > M$, $K \geq 2$ e $i > M$, e a descrição acima do Cenário 8, as Equações a seguir apresentam o cálculo para a probabilidade de que o ciclo seja renovado em uma falha depois de um falso negativo, até $M\Delta$, o custo de manutenção esperado e o tamanho do ciclo de vida esperado, para o Cenário 8.

$$P_8(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=M+1}^K P_{8i}(\Delta, M, K, i) & \text{se } M \geq 1 \\ \sum_{i=M+2}^K P_{8i}(\Delta, M, K, i) & \text{se } M = 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$C_8(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=M+1}^K \left[((i-1)C_i + C_f) P_{8i}(\Delta, M, K, i) \right] & \text{se } M \geq 1 \\ \sum_{i=M+2}^K \left[((i-1)C_i + C_f) P_{8i}(\Delta, M, K, i) \right] & \text{se } M = 0 \end{cases} \quad (33)$$

$$\text{Onde: } P_{8i}(\Delta, M, K, i) = \sum_{j=1}^{i-1} \left[(1-\alpha)^{j-1} \beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1)\Delta-x}^{i\Delta-x} f_H(h) [1 - F_Z(x+h-M\Delta)] dh dx \right] \quad (34)$$

$$L_8(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=M+1}^K \sum_{j=1}^{i-1} \left[(1-\alpha)^{j-1} \beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1)\Delta-x}^{i\Delta-x} (x+h) f_H [1 - F_Z(x+h-M\Delta)] dh dx \right] & \text{se } M \geq 1 \\ \sum_{i=M+2}^K \sum_{j=1}^{i-1} \left[(1-\alpha)^{j-1} \beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1)\Delta-x}^{i\Delta-x} (x+h) f_H [1 - F_Z(x+h-M\Delta)] dh dx \right] & \text{se } M = 0 \end{cases} \quad (35)$$

Dessa forma, pode-se, então, calcular a probabilidade de que o ciclo acabe em uma falha (Equação 4.36), assim como o custo de manutenção esperado para o ciclo acabando em uma falha (Equação 4.37) e o tamanho do ciclo esperado para quando este for finalizado através de uma falha (Equação 4.38).

$$P_{falha}(\Delta, M, K) = \sum_{b=5}^8 P_b(\Delta, M, K) \quad (36)$$

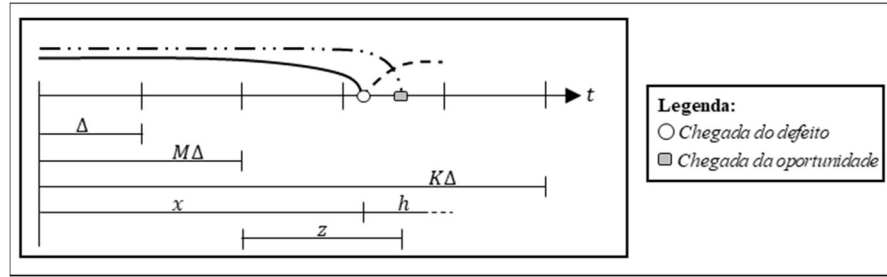
$$C_{falha}(\Delta, M, K) = \sum_{b=5}^8 C_b(\Delta, M, K) \quad (37)$$

$$L_{falha}(\Delta, M, K) = \sum_{b=5}^8 L_b(\Delta, M, K) \quad (38)$$

Cenário 9: Renovação do componente em uma oportunidade, após verdadeiro negativo, estando o componente defeituoso.

A renovação ocorre através de uma oportunidade, sendo esta apenas considerada quando chegar após o limite $M\Delta$. A Figura 14 apresenta essa situação, em que o componente está defeituoso, com o defeito e a oportunidade ocorrido em um mesmo intervalo entre inspeções. Nesse caso, na inspeção anterior o componente não estava defeituoso e um verdadeiro negativo teria acontecido.

Figura 14 – Representação da renovação do componente em uma oportunidade, após verdadeiro negativo, estando o componente defeituoso.



Fonte: A Autora (2019).

Para todos os cenários que apresentam a renovação mediante uma oportunidade (Cenários 9, 10 e 11), o custo de manutenção esperado considera a quantidade de inspeções realizadas antes da oportunidade ocorrer, além do custo de substituir o componente preventivamente em uma oportunidade. Já o tamanho do ciclo será igual a $M\Delta$ mais o tempo para a chegada da oportunidade.

As Equações 4.39, 4.40 e 4.42 representam a probabilidade de renovação do componente frente a uma oportunidade depois de um verdadeiro negativo estando o componente defeituoso, o custo de manutenção esperado para o Cenário 9, e o tamanho esperado do ciclo para o Cenário 9, respectivamente.

$$P_9(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K [P_{9i}(\Delta, M, K, i)] \quad (39)$$

$$C_9(\Delta, M, K) = \left[((i-1)C_i + C_o) P_{9i}(\Delta, M, K, i) \right] \quad (40)$$

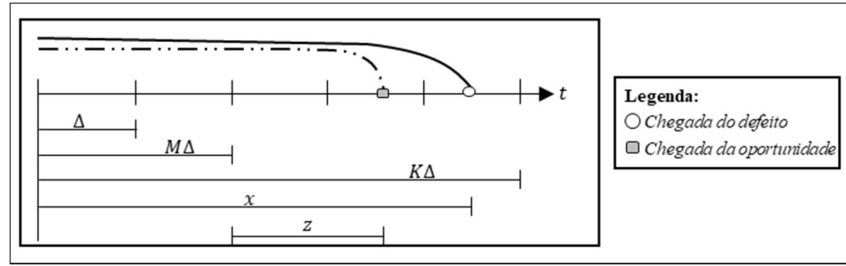
$$\text{Em que: } P_{9i}(\Delta, M, K, i) = (1-\alpha)^{i-1} \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) \int_{x-M\Delta}^{(i-M)\Delta} f_Z(z) [1 - F_H(M\Delta + z - x)] dz dx \quad (41)$$

$$L_9(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K \left[(1-\alpha)^{i-1} \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) \int_{x-M\Delta}^{(i-M)\Delta} (M\Delta + z) f_Z(z) [1 - F_H(M\Delta + z - x)] dz dx \right] \quad (42)$$

Cenário 10: Renovação do componente em uma oportunidade, após verdadeiro negativo, estando o componente bom.

Para esse cenário, é considerado que a oportunidade ocorrerá antes do defeito, isto é, o componente será substituído em uma oportunidade, estando ele em estado bom. Nesse caso, a última inspeção antes da substituição foi um verdadeiro negativo; isso é apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Representação da renovação do componente em uma oportunidade, após verdadeiro negativo, estando o componente bom.



Fonte: A Autora (2019).

A seguir, são apresentadas as Equações para o cálculo da probabilidade de que o ciclo acabe em uma oportunidade após verdadeiro negativo (Equação 4.43), estando o componente bom, o custo de manutenção (Equação 4.44) e o tamanho do ciclo (Equação 4.46) esperados para o Cenário10, considerando também que $K > M$, $M \geq 0$ e $i > M$.

$$P_{10}(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K [P_{10i}(\Delta, M, K, i)] \quad (43)$$

$$C_{10}(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K [((i-1)C_i + C_o) P_{10i}(\Delta, M, K, i)] \quad (44)$$

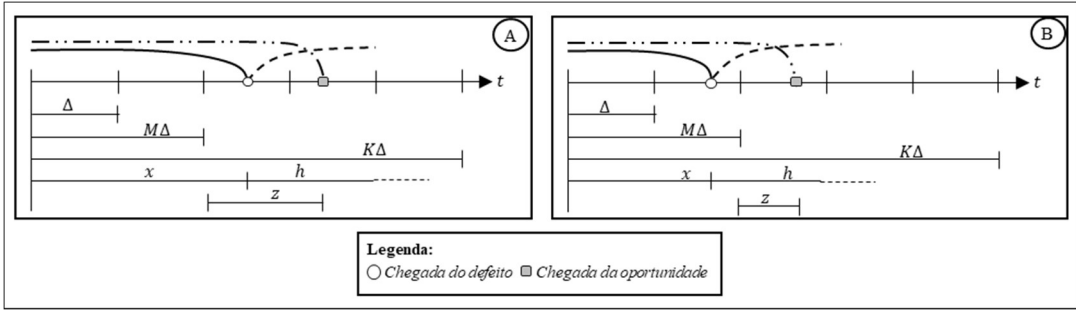
$$\text{Com } P_{10i}(\Delta, M, K, i) = (1-\alpha)^{i-1} \int_{(i-1-M)\Delta}^{(i-M)\Delta} f_z(z) [1 - F_x(M\Delta + z)] dz \quad (45)$$

$$L_{10}(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K \left[(1-\alpha)^{i-1} \int_{(i-1-M)\Delta}^{(i-M)\Delta} (M\Delta + z) f_z(z) [1 - F_x(M\Delta + z)] dz \right] \quad (46)$$

Cenário 11: Renovação do componente em uma oportunidade, após falso negativo.

É também caracterizado pela renovação do ciclo através de uma oportunidade, porém, nesse caso, o componente está em estado defeituoso, e o defeito deve ter acontecido antes da última inspeção, ou seja, pelo menos um falso negativo deve ter acontecido no ciclo. A Figura 16 apresenta essa possibilidade, em que em A o defeito chega depois do limite $M\Delta$, e em B o defeito chega antes.

Figura 16 – Representação da renovação do componente em uma oportunidade, após falso negativo.



Fonte: A Autora (2019).

Considerando que $K > M$ e $K \geq 2$, e que o que foi descrito sobre o Cenário 11 ocorra, é possível calcular a probabilidade de que o componente seja renovado em uma oportunidade após um falso negativo, o custo de manutenção e o tamanho do ciclo esperados para o Cenário 11 pelas Equações 4.47, 4.48 e 4.50, respectivamente.

$$P_{11}(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=M+1}^K P_{11i}(\Delta, M, K, i) & \text{se } M \geq 1 \\ \sum_{i=M+2}^K P_{11i}(\Delta, M, K, i) & \text{se } M = 0 \end{cases} \quad (47)$$

$$C_{11}(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=M+1}^K [((i-1)C_i + C_o) P_{11i}(\Delta, M, K, i)] & \text{se } M \geq 1 \\ \sum_{i=M+2}^K [((i-1)C_i + C_o) P_{11i}(\Delta, M, K, i)] & \text{se } M = 0 \end{cases} \quad (48)$$

$$\text{Onde: } P_{11i}(\Delta, M, K, i) = \sum_{j=1}^{i-1} \left[(1-\alpha)^{j-1} \beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1-M)\Delta}^{(i-M)\Delta} f_Z(z) [1 - F_H(M\Delta + z - x)] dz dx \right] \quad (49)$$

$$L_{11}(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=M+1}^K \sum_{j=1}^{i-1} \left[(1-\alpha)^{j-1} \beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1-M)\Delta}^{(i-M)\Delta} (M\Delta + z) f_Z(z) [1 - F_H(M\Delta + z - x)] dz dx \right] & \text{se } M \geq 1 \\ \sum_{i=M+2}^K \sum_{j=1}^{i-1} \left[(1-\alpha)^{j-1} \beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1-M)\Delta}^{(i-M)\Delta} (M\Delta + z) f_Z(z) [1 - F_H(M\Delta + z - x)] dz dx \right] & \text{se } M = 0 \end{cases} \quad (50)$$

Pose-se, então, definir a probabilidade de que o ciclo acabe em uma oportunidade, assim como o custo de manutenção esperado e o tamanho esperado do ciclo, conforme apresentam as Equações 4.51, 4.52 e 4.53, respectivamente.

$$P_{oport}(\Delta, M, K) = \sum_{b=9}^{11} P_b(\Delta, M, K) \quad (51)$$

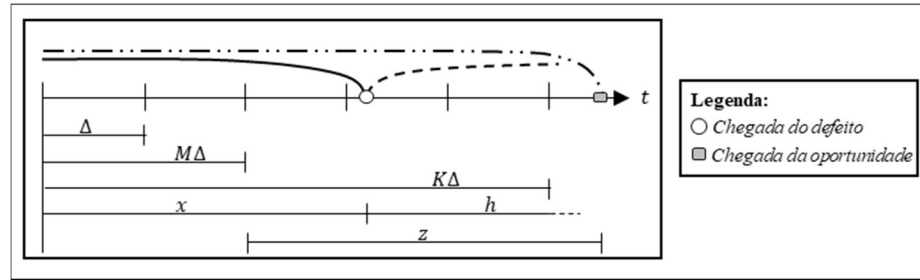
$$C_{oport}(\Delta, M, K) = \sum_{b=9}^{11} C_b(\Delta, M, K) \quad (52)$$

$$L_{oport}(\Delta, M, K) = \sum_{b=9}^{11} L_b(\Delta, M, K) \quad (53)$$

Cenário 12: Renovação do componente no limite de vida estabelecido para o componente, em estado defeituoso.

Nesse caso, o componente será substituído quando atingir o limite de vida estipulado para ele, porém, em algum momento o defeito chegou, mas não foi detectado em nenhuma inspeção subsequente. Assim, ocorreram um ou mais falsos negativos, conforme apresenta a Figura 17.

Figura 17 – Representação da renovação do componente no limite de vida estabelecido para o componente, em estado defeituoso.



Fonte: A Autora (2019).

Dessa maneira, e considerando que $M \geq 0$ e $K \geq M+1$, a probabilidade de que o ciclo acabe com o fim do ciclo de vida do componente é dado pela Equação 4.54, o custo de manutenção esperado para o Cenário 12 pela Equação 4.55, e o tamanho esperado do ciclo pela Equação 4.56.

$$P_{12}(\Delta, M, K) = \sum_{i=1}^K \left[(1-\alpha)^{i-1} \beta^{K-i} [1-F_Z((K-M)\Delta)] \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) [1-F_H(K\Delta-x)] dx \right] \quad (54)$$

$$C_{12}(\Delta, M, K) = ((K-1)C_i + C_p) P_{12}(\Delta, M, K) \quad (55)$$

$$L_{12}(\Delta, M, K) = (K\Delta) P_{12}(\Delta, M, K) \quad (56)$$

Cenário 13: Renovação do componente no limite de vida estabelecido para o componente, em estado bom.

Para esse cenário, é considerado que o componente seja renovado no fim da sua vida, estando ele em estado bom, ou seja, nem defeito, nem falhas nem oportunidades ocorreram durante o período analisado, ou seja, todas as inspeções foram verdadeiros negativos. Considerando também que $M \geq 0$ e $K > M+1$, é possível calcular a probabilidade de que o ciclo seja renovado no limite de vida do componente, estando ele em estado bom, o custo de manutenção esperado e o tamanho esperado do ciclo para esse cenário.

$$P_{13}(\Delta, M, K) = (1 - \alpha)^{K-1} [1 - F_X(K\Delta)] [1 - F_Z((K - M)\Delta)] \quad (57)$$

$$C_{13}(\Delta, M, K) = ((K - 1)C_i + C_p) P_{13}(\Delta, M, K) \quad (58)$$

$$L_{13}(\Delta, M, K) = (K - \Delta) P_{13}(\Delta, M, K) \quad (59)$$

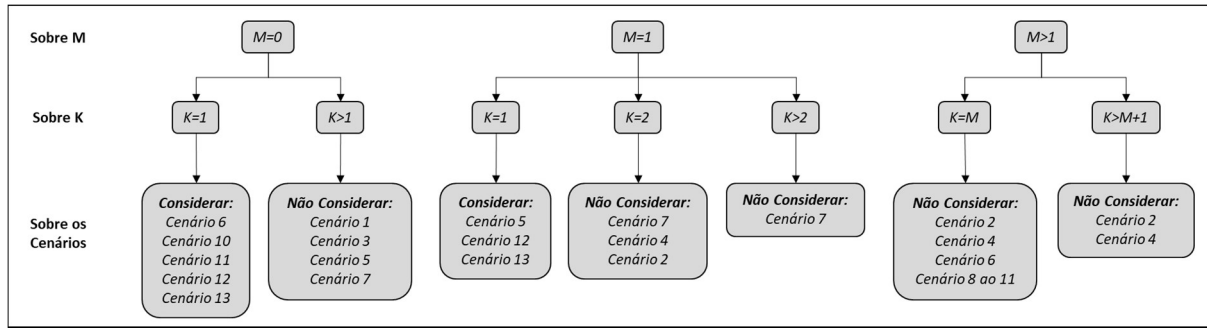
O custo esperado por ciclo, $E\{C(\Delta, M, K)\}$, é calculado através da Equação 4.60. Ela trata da soma dos custos esperados para cada um dos cenários, sendo os custos ponderados pelas probabilidades de ocorrência de cada um desses cenários, como visto anteriormente.

$$E\{C(\Delta, M, K)\} = C_{insp}(\Delta, M, K) + C_{falha}(\Delta, M, K) + C_{oport}(\Delta, M, K) + C_{12}(\Delta, M, K) + C_{13}(\Delta, M, K) \quad (60)$$

O cálculo do tamanho esperado do ciclo do componente é dado pela soma do tamanho esperado do ciclo para cada um dos cenários apresentados anteriormente, dado pela Equação 4.61. Lembrando que o tamanho esperado do ciclo para cada cenário foi ponderada pela probabilidade de ocorrência desse cenário, conforme já explicado.

$$E\{L(\Delta, M, K)\} = L_{insp}(\Delta, M, K) + L_{falha}(\Delta, M, K) + L_{oport}(\Delta, M, K) + L_{12}(\Delta, M, K) + L_{13}(\Delta, M, K) \quad (61)$$

O cálculo do custo esperado e do tamanho do ciclo apresentados pelas Equações 4.60 e 4.61 depende da combinação entre as variáveis M e K . A depender dessa combinação alguns Cenários não devem ser considerados. Essa combinação é apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Combinação de M e K para o cálculo do custo e do tamanho do ciclo.

Fonte: A Autora (2019).

A fim de buscar o valor ótimo para as variáveis de decisão do modelo, utiliza-se a Equação 4.62, conforme proposto por Scarf *et al.* (2009). Para tanto, essa equação será minimizada, encontrando o ponto em que se tem a menor taxa de custo por unidade de tempo.

$$C_{\infty}(\Delta, M, K) = \frac{E\{C(\Delta, M, K)\}}{E\{L(\Delta, M, K)\}} \quad (62)$$

Além disso, tem-se que o cálculo do tempo médio entre falhas operacionais (MTBOF – *Mean time between operational failure*) pode apresentar uma boa medida da confiabilidade do sistema (SCARF; CAVALCANTE, 2012). Este pode ser calculado considerando a probabilidade do ciclo acabar com uma falha e o tamanho esperado do ciclo, conforme apresenta a Equação 4.63.

$$MTBOF(\Delta, M, K) = \frac{E\{L(\Delta, M, K)\}}{P_{falha}(\Delta, M, K)} \quad (63)$$

Onde $P_{falha}(\Delta, M, K)$ é calculada pela Equação 4.36.

Todas as equações apresentadas foram transcritas para um *software* de cálculos que permite realizar a modelagem do problema através da transcrição das equações como também realiza o processo de otimização a partir do fornecimento dos parâmetros de *input*.

4.4 Aplicação numérica do modelo de manutenção desenvolvido

O propósito agora é investigar o comportamento do modelo proposto e verificar como as variáveis do modelo se comportam, avaliando a minimização da taxa esperada do custo de

manutenção e o intervalo médio entre falhas operacionais (MTBOF) para os valores ótimos do custo. Para tanto serão analisados dois casos:

1. Todas as ações de manutenção são realizadas por uma equipe local, ou seja, o time de manutenção da empresa realiza as funções de inspeção e substituição. A utilização desse time tem como consequência menores custos de manutenção, porém a qualidade das ações é menor;
2. Todas as ações de manutenção são realizadas por uma equipe especializada de manutenção (OEM – *Original Equipment Manufacturer*), em que sua contratação é regida por contratos. De fato, utilizar uma equipe OEM proporciona maior qualidade de manutenção, em que não existam erros na inspeção, porém o custo relacionado a essa contratação é mais alto do que utilizar a equipe Local.

A utilização da avaliação dessas duas equipes distintas para realizar a manutenção, reflete em valores diferentes para os parâmetros de qualidade das inspeções, da qualidade da manutenção e dos custos (inspeção, preventiva, preventiva oportuna e falha)

Dessa maneira, os dados apresentados farão referência a esses dois casos, com um indicativo de índice (1 e 2) para indicar a qual caso se está analisando, quando for necessário. Por exemplo, o parâmetro p de mistura da população será apresentado como p_1 para o caso em que as ações de manutenção são realizadas pela equipe local e, p_2 , para o caso em que são realizadas pela equipe especializada, a mesma lógica ocorre para os demais parâmetros para os quais exista essa diferenciação.

Como forma de modelar a qualidade da manutenção, pode-se utilizar uma população heterogênea para os componentes (SCARF *et al.*, 2009). Essa heterogeneidade pode ser proveniente por defeitos na fabricação do componente ou por diferença de qualidade da substituição ou por ambos, em que itens fracos sujeitos a falhas precoces e itens forte sujeitos a vida mais longa. Dessa forma, Berrade, Cavalcante e Scarf (2012) afirmam que a chegada dos defeitos pode ser modelada de acordo com uma distribuição de probabilidade mista, caracterizada por itens fortes e itens fracos.

Assim, $f_X(x)$ representa a função para a chegada do defeito no equipamento, em que é uma função densidade de probabilidade mista com taxa de falha crescente, representada através de uma distribuição de Weibull, com parâmetro de forma b_w e b_s , e com parâmetro de escala dado por η_w e η_s . Então a distribuição pode ser verificada na Equação (4.64) a seguir.

$$f_X(x) = pf_w(x) + (1-p)f_s(x) \quad (64)$$

Em que:

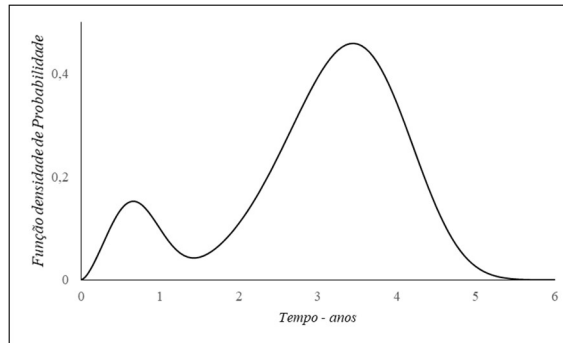
p - Parâmetro de mistura da população

$$f_w(x) = \frac{b_w}{\eta_w} \left(\frac{x}{\eta_w} \right)^{b_w-1} e^{-\left(x/\eta_w\right)^{b_w}} \quad (65)$$

$$f_s(x) = \frac{b_s}{\eta_s} \left(\frac{x}{\eta_s} \right)^{b_s-1} e^{-\left(x/\eta_s\right)^{b_s}} \quad (66)$$

A Figura 19 representa o comportamento da função $f_X(x)$ para um caso qualquer, em que $b_w = 2,5$, $b_s = 5$, $\eta_w = 0,8$, $\eta_s = 3,6$ e $p=0,12$.

Figura 19 – Gráfico da função $f_X(x)$.



Fonte: A Autora (2019).

Quanto à chegada da falha, que ocorre através do modelo de *delay-time*, foi considerada uma distribuição exponencial para caracterizar a taxa de falha do equipamento. Isso é bastante razoável pela característica da distribuição exponencial não guardar memória, útil para a modelagem de falha de acordo com o *delay-time*. Sendo assim, $f_H(h)$ pode ser representada pela Equação (4.67).

$$f_H(h) = \lambda_H e^{-(\lambda_H h)} \quad (67)$$

Em que: λ_H é a taxa de chegada de falha, e $\lambda_H = 1/\mu_H$.

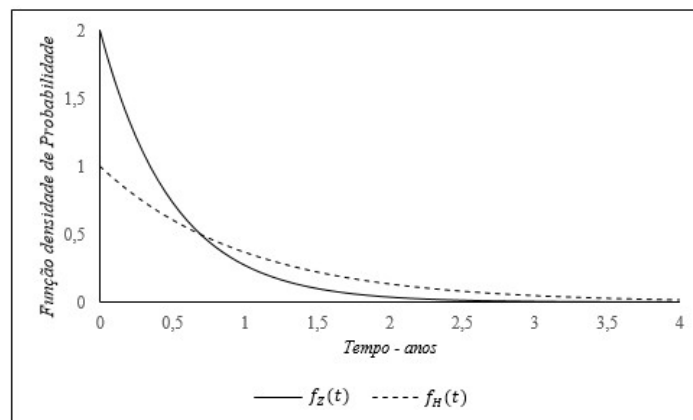
Para a escolha da distribuição de probabilidade que representa a chegada da oportunidade, considera-se que as chegadas das oportunidades ocorrem de acordo com um processo de Poisson, assim, o tempo entre as chegadas pode ser representado pela distribuição exponencial. Então, a função que representa a taxa de chegada das oportunidades é apresentada na Equação (4.68).

$$f_z(z) = \lambda_z e^{-(\lambda_z z)} \quad (68)$$

Conforme discutido anteriormente, as oportunidades surgem para o componente analisado através de paradas do sistema provenientes de manutenção preventiva ou corretiva dos demais componentes do sistema. Ou também através de paradas ocasionadas por eventos externos, tais como falta de demanda, falta de produtos para serem produzidos.

A Figura 20 apresenta o gráfico das funções para a densidade de probabilidade da chegada da falha e a chegada da oportunidade. A chegada da oportunidade possui um decaimento mais rápido do que da falha, pois $\lambda_H < \lambda_Z$.

Figura 20 – Gráfico das funções $f_H(h)$ e $f_Z(z)$.



Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros para avaliação do modelo para os dois casos apresentados anteriormente, e os seus respectivos valores. Observa-se que os parâmetros que tratam das distribuições de probabilidades para a chegada do defeito, da falha e da oportunidade não se diferenciam, sendo diferentes os parâmetros relacionados aos custos, a qualidade da inspeção e a qualidade da manutenção.

A próxima seção do trabalho tem o intuito de apresentar os resultados obtidos com a aplicação numérica e tecer alguns comentários sobre eles, fazendo uma série de análises frente às variações dos parâmetros.

Tabela 1 – Valores utilizados para a aplicação numérica para o modelo de minimização do custo original

Parâmetro	Descrição	Valores*	
		Caso 1	Caso 2
α	Probabilidade de ocorrência de falso positivo	0,1	0
β	Probabilidade de ocorrência de falso negativo	0,2	0
b_w	Parâmetro de forma da chegada do defeito (componente fraco)	2,5	2,5
η_w	Parâmetro de escala da chegada do defeito (componente fraco)	0,8	0,8
b_s	Parâmetro de forma da chegada do defeito (componente forte)	5	5
η_s	Parâmetro de escala da chegada do defeito (componente forte)	3,6	3,6
λ_z	Taxa de chegada de oportunidade	2	2
μ_H	Parâmetro para o cálculo da chegada de falha	1	1
p	Parâmetro de mistura da amostra	0,12	0,05
C_p	Custo de substituição preventiva	1,00	1,00
C_f	Custo de substituição do componente na falha	5,00	7,50
C_o	Custo de substituição em uma oportunidade	0,50	0,80
C_i	Custo de inspeção	0,03	0,09

Fonte: A Autora (2019).

*O tempo é dado em anos.

4.5 Análise e discussão dos resultados para o modelo de minimização do custo

A Tabela 2 apresenta o resultado para a aplicação numérica do modelo de minimização da taxa de custo por unidade de tempo. Nela é possível identificar os valores para o Caso 1, em que todas as ações de manutenção são realizadas por uma equipe de manutenção local, enquanto no Caso 2 as ações de manutenção são realizadas pela equipe especializada OEM.

Os custos de manutenção (inspeção e substituição) para a equipe local são mais baixos do que para a OEM, porém a qualidade das ações é inferior para a equipe local. Essa situação é refletida pelos resultados apresentados na Tabela 2, quando a taxa de custo por unidade de tempo do Caso 1 é inferior ao Caso 2, 0,5108 e 0,5830, respectivamente, assim como o MTBOF que para o Caso 1 é igual a 24,06 e para o Caso 2 é igual a 44,99.

É possível identificar, também, que o tamanho do ciclo esperado para o Caso 1 é maior que para o Caso 2, 4,088 e 2,991 respectivamente, em que tal métrica é dada pela multiplicação entre o intervalo médio entre inspeções e o número de inspeções em um ciclo. Em relação à oportunidade, observa-se que apenas aquela que chegar após o componente atingir a idade de 2,022 para o Caso 1 e 1,994 para o Caso 2 será considerada.

Tabela 2 – Resultados para o modelo de minimização do custo.

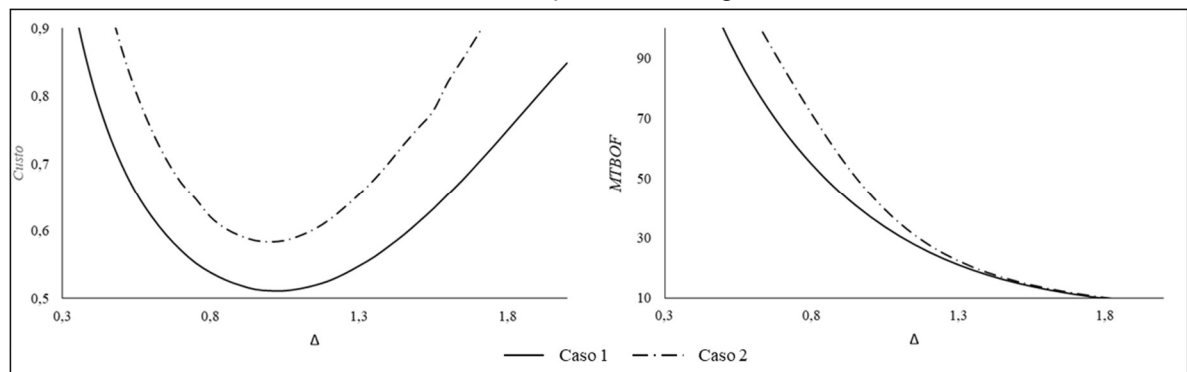
Caso	Valores ótimos para as variáveis de Decisão			Valores para os critérios de decisão	
	Δ	M	K	C_{∞}	$MTBOF$
Caso 1 – Manutenção Local	1,022	2	4	0,5108	24,06
Caso 2 – OEM	0,997	2	3	0,5830	44,99

Fonte: A Autora (2019).

Tais resultados tornam evidente o que já era esperado para o modelo. A inclusão de erros nas ações de manutenção tende a deixar o sistema menos confiável (Caso 1), enquanto a utilização de ações com menor probabilidade de erros tende a ser mais cara.

A Figura 21 apresenta o comportamento das funções que representam a taxa de custo esperada por unidade de tempo e o MTBOF para ambos os casos avaliados. Nela, fica visível a diferença existente entre os valores desses dois critérios de decisão para cada um dos casos, em que para o Caso 1, os valores de custo são inferiores, ao passo que para os valores do MTBOF o Caso 2 possui valores maiores. É possível observar também que o MTBOF é uma função monotonicamente decrescente, não atingindo um ponto de máximo ou de mínimo e, por esse motivo, é calculado com os valores ótimos das variáveis de decisão para o mínimo custo.

Figura 21 – Gráfico das funções da taxa de custo por unidade de tempo e MTBOF para os Casos 1 e 2 do modelo de minimização do custo original.



Fonte: A Autora (2019).

Dessa forma, o gestor de manutenção tem um impasse a decidir. Se a priorização da manutenção está relacionada aos custos, ele deve escolher utilizar apenas a equipe local para as ações de manutenção. Porém, se a confiabilidade é um ponto crucial para o sistema, a escolha pela equipe da OEM parece ser a mais indicada. Muito embora, a partir de certo tempo para o intervalo entre inspeções, o MTBOF se iguala para ambos os casos, porém o valor para Δ se distancia do valor ótimo encontrado pelo processo de minimização da taxa de custo.

Para entender a influência dos erros na inspeção nos resultados do modelo de minimização do custo, a Tabela 3 apresenta variações para os valores dos parâmetros de falso negativo (β) e falso positivo (α). Tal avaliação é feita apenas para o Caso 1, pois a manutenção realizada pela OEM tem 100% de acurácia na execução das atividades. Os casos que são considerados “sem ignorância” consistem em o gestor de manutenção saber que existe a probabilidade de ocorrência de erros e considera-los de forma correta na avaliação. Já os casos “com ignorância” consideram que os erros estão presentes, porém eles não são avaliados adequadamente.

Tabela 3 – Variações para os parâmetros de falso positivo e falso negativo para o modelo de minimização do custo.

Parâmetros		Valores ótimos para as variáveis de Decisão			Valores para os critérios de decisão				Diferença no Custo (%)	Diferença no MTBOF (%)
α	β	A	M	K	Sem ignorância		Com ignorância			
					C_{∞}	MTBOF	C_{∞}	MTBOF		
0,1	0,2	1,022	2	4	0,5108	24,06	0,5694	35,12	11,47	45,97
0,15	0,2	1,918	1	2	0,5345	17,89	0,6361	36,14	19,01	102,01
0,2	0,2	1,975	1	2	0,5454	17,50	0,7059	37,14	29,43	112,23
0,05	0,2	0,983	2	4	0,4833	25,03	0,5058	34,08	4,66	36,16
0	0,2	0,503	4	8	0,4452	33,95	0,4453	33,03	0,02	-2,71
0,1	0,25	1,020	2	4	0,5157	23,28	0,5749	33,17	11,48	42,48
0,1	0,3	1,018	2	4	0,5208	22,53	0,5806	31,36	11,48	39,19
0,1	0,15	1,024	2	4	0,5058	24,90	0,5642	27,19	11,55	9,20
0,1	0,1	1,026	2	4	0,5009	25,79	0,5592	39,43	11,64	52,89
0,1	0,05	1,028	2	4	0,4960	26,73	0,5544	41,83	11,77	56,49
0,1	0	1,030	2	4	0,4911	27,73	0,5498	44,42	11,95	60,19
0	0	0,512	4	8	0,4254	41,13	-	-	-	-
0	0,05	0,510	4	8	0,4301	39,15	0,5301	38,89	23,25	-0,66
0	0,1	0,508	4	8	0,4349	37,28	0,4349	36,80	0,00	-1,29
0	0,15	0,505	4	8	0,4399	35,63	0,4400	34,85	0,02	-2,19
0	0,3	0,498	4	8	0,4563	30,96	0,4566	29,72	0,07	-4,01
0,05	0	0,993	2	4	0,4642	28,78	0,4860	42,76	4,70	48,58
0,15	0	1,067	2	4	0,5175	26,71	0,6167	46,09	19,17	72,56
0,2	0	1,981	1	2	0,5405	18,05	0,6867	47,72	27,05	164,38
0,3	0	2,100	1	2	0,5608	17,32	0,8353	51,14	48,95	195,27
0,2	0,3	1,973	1	2	0,5478	17,23	0,7169	32,92	30,87	91,06

Fonte: A Autora (2019).

Dessa forma, a Tabela 3 também apresenta a diferença do custo para quando o gestor de manutenção define uma política de manutenção considerando a não existência de erros, quando na verdade eles acontecem. Isso ocorre quando os valores para as variáveis de decisão são definidos com os valores ótimos de $\alpha=\beta=0$, porém há erros, e eles são então ignorados. É possível observar que a ignorância incorre em custos mais elevados, quando se observa a diferença da taxa de custo de manutenção para quando os erros são considerados corretamente com a ignorância da existência.

A partir da Tabela 3, observa-se que há um incremento na taxa de custo de manutenção, em termos de porcentagem, quando a probabilidade de ocorrência de erros na inspeção é negligenciada pelo gestor. Como por exemplo a última avaliação apresentada na referida Tabela, percebe-se um aumento de 30,87% na taxa de custo de manutenção quando se tem valores altos para as probabilidades de ocorrência de erros, porém o decisor considera que não há erros para definir a política. Ou mesmo quando se tem probabilidades baixas para os erros, observa um pequeno aumento na taxa de custo de manutenção, como quando $\alpha=0,05$. Tais fatos evidenciam que a ignorância é um fato que o decisor precisa se preocupar.

Em contrapartida, para o caso estudado, observa-se que melhores valores para o MTBOF ocorrem para alguns casos. Isso ocorre, muito provavelmente, pelo fato de que o intervalo entre inspeções considerado pelo decisor quando há ignorância é inferior ao valor de quando não há, resultando em inspeções mais frequentes, e um MTBOF maior.

Ainda sobre a Tabela 3, observa-se que à medida que se aumenta a probabilidade de ocorrência dos falsos negativos, pode-se observar que as inspeções se tornam mais frequentes, a taxa de custo por unidade de tempo aumenta e a confiabilidade diminui. Muito embora, a quantidade de inspeções não foi alterada quando apenas a probabilidade do falso positivo foi modificada, mantendo os mesmos valores do caso base da avaliação. Enquanto isso, à medida que se aumenta a probabilidade de ocorrência de falso positivo observa-se uma diminuição na frequência das inspeções, aumento da taxa de custo por unidade de tempo e diminuição da confiabilidade. Isso pode ser ocasionado pelo fato de que em um falso positivo um componente que está em estado bom possa ser substituído por um componente fraco. Nesse sentido, há um aumento mais significativo na taxa de custo por unidade de tempo quando se aumenta a probabilidade de ocorrência de falso positivo do que quando se aumenta a probabilidade de falso negativo.

Quando $\alpha=\beta=0$, observa-se uma diminuição significativa na taxa de custo por unidade de tempo, aumentando o MTBOF. No entanto, mesmo considerando que não haveria possibilidade de ocorrência de erro nas inspeções realizadas pela equipe local, a confiabilidade do sistema não ultrapassa a confiabilidade de quando a OEM realiza a manutenção. Essa situação é ocasionada pelo fato de que a equipe local possui pior qualidade na execução da substituição do que a OEM, através da avaliação do parâmetro de mistura da população dos componentes (p), em que para o Caso 1 p é maior que no Caso 2.

A Tabela 3 apresentou diferentes variações para os parâmetros α e β justamente pelo fato de que definí-los pode não ser uma tarefa tão fácil pelo gestor de manutenção. Esses parâmetros

podem ser baseados em uma medida de vezes que, por exemplo, quando a equipe for realizar a substituição encontrar o componente em estado bom, ou quando em uma inspeção for verificado que o desgaste do componente está muito elevado, apontando que o defeito já estava presente a um certo tempo, até mesmo antes da inspeção anterior (falso negativo).

Uma demonstração do comportamento dos dois casos, perante alteração nos valores da qualidade da substituição, é apresentada na Tabela 4. É possível verificar que, mesmo se fosse avaliada uma situação na qual a diferença entre os valores de p não fosse tão grande (avaliação 1 e 8 da Tabela 4), havendo uma grande variação no custo de substituição por falha e por se ter possibilidade de ocorrência de falso positivo e falso negativo (Caso 1), a confiabilidade do componente para os casos avaliados não se aproxima. Dessa forma, identifica-se que à medida em que a qualidade da manutenção piora, maior é a taxa de custo por unidade de tempo e menor é a confiabilidade do sistema.

Tabela 4 – Variação no parâmetro de qualidade da manutenção para o modelo de minimização do custo.

Caso	Avaliação	Parâmetro	Valores ótimos para as variáveis de Decisão			Valores para os critérios de decisão	
		p	A	M	K	C_{∞}	$MTBOF$
Caso 1	1	0,12	1,022	2	4	0,5108	24,06
	2	0,15	1,029	2	4	0,5453	20,82
	3	0,2	1,039	2	4	0,6052	16,89
	4	0,09	1,848	1	2	0,4763	22,38
	5	0,05	1,834	1	2	0,4154	31,3
	6	0	1,816	1	2	0,3419	60,45
Caso 2	7	0,05	0,997	2	3	0,5830	44,99
	8	0,10	1,007	2	3	0,6463	32,97
	9	0,15	1,017	2	3	0,7134	25,74
	10	0	1,790	1	2	0,5078	61,79

Fonte: A Autora (2019).

Alterações no parâmetro p referem-se à qualidade de manutenção, pois aumentando a probabilidade de substituição do componente por um componente fraco deixa o sistema mais vulnerável à chegada de defeitos e à consequente falha mais precocemente.

É importante realizar análise de alguns parâmetros que possam influenciar fortemente no comportamento do modelo apresentado, conforme pode ser verificado na Tabela 5. As avaliações 2, 3, 5 e 6 da Tabela 5 referem-se à alteração no parâmetro de chegadas de oportunidade do sistema. Ambos os casos apresentaram um aumento da janela de tempo para ocorrência de oportunidades quando a taxa de chegadas de oportunidade aumentou, diminuindo a taxa de custo por unidade de tempo e aumentando o MTBOF.

Tabela 5 – Variação em alguns parâmetros do modelo de minimização do custo

Casos	Avaliação	Parâmetros								Valores ótimos para as variáveis de Decisão			Valores para os critérios de decisão	
		β	α	p	C_p	C_i	C_f	C_o	λ_z	Δ	M	Δ	M	Δ
Caso 1	1	0,1	0,2	0,12	1	0,03	5	0,5	2	1,022	2	4	0,5108	24,06
	2	0,1	0,2	0,12	1	0,03	5	0,5	1	0,883	2	4	0,5477	23,04
	3	0,1	0,2	0,12	1	0,03	5	0,5	3	1,083	2	4	0,4980	25,11
Caso 2	4	0	0	0,05	1	0,09	7,5	0,8	2	0,997	2	3	0,5830	44,99
	5	0	0	0,05	1	0,09	7,5	0,8	1	0,919	2	3	0,6007	44,73
	6	0	0	0,05	1	0,09	7,5	0,8	3	1,012	2	3	0,5720	46,12
	7	0	0	0,05	1	0,09	13	0,8	2	0,883	2	3	0,6878	59,33
	9	0	0	0,05	1	0,09	19	0,8	2	0,597	3	4	0,7738	80,1

Fonte: A Autora (2019).

As avaliações 7 e 9 da Tabela 5 apresentam uma variação no custo da substituição em uma falha realizada pela OEM. Nessas avaliações, é possível verificar que o MTBOF aumenta consideravelmente. Isso ocorre porque ele está relacionado com o intervalo entre as inspeções, à medida em que ele é reduzido, a probabilidade que se ocorra uma falha diminui. Além disso, com esse aumento no custo, não se espera o componente falhar para substituir, pois se torna muito caro, fazendo-se inspeções mais frequentes.

Além disso, é possível analisar que algumas modificações no modelo podem ser realizadas avaliando as situações que ocorrem nas ações de manutenção que não foram consideradas no modelo em questão. Essa possibilidade é apresentada no tópico seguinte.

4.6 Proposição de modificação: não renovação do componente em falso positivo.

Tendo apresentado todos os aspectos do modelo, assim como o seu teste através de uma aplicação numérica e de análise de sensibilidade, propõe-se agora uma modificação para esse modelo quanto à possibilidade de renovação do componente. Uma inspeção pode ter um resultado positivo ou negativo, ou seja, foi encontrado um defeito no componente, ou não. Se esse resultado for positivo, uma investigação a mais será feita para descartar a possibilidade de ocorrência de um erro, a qual se dá através de uma equipe especializada, geralmente pertencente à empresa que produz o componente, chamada de OEM (*Original Equipment Manufacturer* – Fabricante Original do Equipamento). Dessa maneira, é descartada a possibilidade de haver renovação do componente em um falso positivo.

Neste caso, quando há resultado positivo na inspeção, um custo adicional para chamar a OEM para verificar a veracidade da existência do positivo é contabilizado (C_v), aumentando o

custo de manutenção. No entanto, ainda pode acontecer falso negativo, em que o defeito está presente no componente e esse não foi identificado na inspeção, podendo o componente falhar antes mesmo de ser checado na próxima inspeção.

Essa é uma política de manutenção híbrida, na qual parte das ações de manutenção é realizada pela equipe local, e parte por uma equipe especializada. Nesse sentido, esse modelo se aplica nos casos em que uma OEM realiza as ações de substituições do equipamento, além de inspeções quando forem solicitadas e a equipe local realiza as ações de inspeção. Tal situação leva a uma diminuição dos erros nas substituições, enquanto o custo pode ser intermediário.

Assim, o componente poderá ser substituído:

- A. Em uma inspeção até $M\Delta$, devido um verdadeiro positivo;
- B. Em uma inspeção depois de $M\Delta$, devido um verdadeiro positivo;
- C. Em uma falha até $M\Delta$, após verdadeiro negativo;
- D. Em uma falha depois $M\Delta$, após verdadeiro negativo;
- E. Em uma falha até $M\Delta$, após falso negativo;
- F. Em uma falha depois $M\Delta$, após falso negativo;
- G. Em uma oportunidade, após verdadeiro negativo, estando o componente defeituoso;
- H. Em uma oportunidade, após verdadeiro negativo, estando o componente bom;
- I. Em uma oportunidade, após falso negativo;
- J. No limite de vida estabelecido para o componente, com o componente defeituoso;
- K. No limite de vida estabelecido para o componente, com o componente bom.

Cada uma dessas possibilidades de renovação é um cenário possível para o modelo sem renovação em falso positivo, sendo que esses cenários se assemelham com os do modelo original. Observa-se que a renovação em uma inspeção devido um falso positivo não ocorre mais, diferente do que acontecia no modelo original.

Dessa forma, como feito no modelo original, esses cenários são necessários para cobrir todas as possibilidades de renovação do sistema através de ações preventivas, corretivas ou oportunas, o que exaure todas as possibilidades de ocorrências referentes à manutenção no componente. Tal situação é verificada através da soma das probabilidades de ocorrência de cada um dos cenários, a qual deve ser igual a 1. Esses cenários são agora identificados de A até K para que se diferenciem dos cenários do modelo original.

Cenário A: renovação em uma inspeção até $M\Delta$, devido a um verdadeiro positivo.

Esse cenário é semelhante ao Cenário 1 apresentado no item 4.3, porém agora não é mais considerado o termo $(1 - \alpha)$ nas equações. O cálculo da probabilidade que o componente seja renovado em uma inspeção até $M\Delta$ pode ser realizado pela Equação 4.1, porém substituindo o termo $P_{1i}(\Delta, M, i)$ por $P_{Ai}(\Delta, M, i)$, o qual é definido na Equação 4.69 a seguir. Essa mesma substituição deve ser realizada na Equação 4.3 que calcula tamanho esperado do ciclo para esse cenário.

$$P_{Ai}(\Delta, M, i) = \sum_{j=1}^i \left[\beta^{i-j} (1-\beta) \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) [1 - F_H(i\Delta - x)] \right] \quad (69)$$

O cálculo do custo esperado de manutenção para o Cenário A é dado pela Equação 4.70.

$$C_A(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=1}^M \left[[\alpha(j-1)C_v + iC_i + C_v + C_p] P_{Ai}(\Delta, M, i) \right] & \text{se } M \geq 1, K > M \\ \sum_{i=1}^{M-1} \left[[\alpha(j-1)C_v + iC_i + C_v + C_p] P_{Ai}(\Delta, M, i) \right] & \text{se } M \geq 2, K = M \end{cases} \quad (70)$$

Cenário B: renovação do componente ocorre em uma inspeção depois de $M\Delta$, devido um verdadeiro positivo.

Esse cenário está relacionado ao Cenário 2 apresentado no item 4.3, no qual o defeito é identificado corretamente em uma inspeção que ocorre após M e, por isso, deve-se considerar que, a fim da renovação do componente em uma inspeção, a oportunidade não aconteça antes. Assim, a probabilidade de que o ciclo acabe em uma inspeção depois de $M\Delta$ e o tamanho esperado do ciclo são calculados através das Equações 4.5 e 4.7, respectivamente, em que o termo $P_{2i}(\Delta, M, K, i)$ deve ser substituído por $P_{Bi}(\Delta, M, K, i)$, que é definido através da Equação 4.71. Além disso, o custo esperado de manutenção para esse cenário é apresentado na Equação 4.72.

$$P_{Bi}(\Delta, M, K, i) = \sum_{j=1}^i \left[\beta^{i-j} (1-\beta) [1 - F_Z((i-M)\Delta)] \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) [1 - F_H(i\Delta - x)] \right] \quad (71)$$

$$C_B(\Delta, M, K) = \sum_{i=(M+1)}^{K-1} \left[[\alpha(j-1)C_v + iC_i + C_v + C_p] P_{Bi}(\Delta, M, K, i) \right] \quad (72)$$

Cenário C: Renovação do componente se dá em uma falha até $M\Delta$, após verdadeiro negativo.

Esse cenário está relacionado ao Cenário 4 apresentado na seção 4.3 anteriormente, em que o cálculo da probabilidade que um ciclo finalize em uma falha até M , após um verdadeiro negativo, é realizado através da Equação 4.20, na qual o termo $P_{5i}(\Delta, M, i)$ deve ser substituído por $P_{Ci}(\Delta, M, i)$, apresentado na Equação 4.73 a seguir. O custo esperado de manutenção para esse cenário e o tamanho esperado do ciclo são calculados através da Equação 4.74 e da Equação 4.75, respectivamente.

$$P_{Ci}(\Delta, M, i) = \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) \int_0^{i\Delta-x} f_H(h) dh dx \quad (73)$$

$$C_C(\Delta, M, K) = \sum_{i=1}^M \left[\left[\alpha(i-1)C_v + (i-1)C_i + C_f \right] P_{Ci}(\Delta, M, i) \right] \quad (74)$$

$$L_C(\Delta, M, K) = \sum_{i=1}^M \left[\int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) \int_0^{i\Delta-x} (x+h) f_H(h) dh dx \right] \quad (75)$$

Cenário D: Renovação do componente ocorre em uma falha depois $M\Delta$, após verdadeiro negativo.

Esse cenário se assemelha ao Cenário 6 apresentado no item 4.3 desse trabalho, no qual o defeito e a falha do componente ocorrem em um mesmo intervalo entre inspeções, de maneira que a probabilidade de que isso aconteça é expresso pela Equação 4.24, porém o termo $P_{6i}(\Delta, M, K, i)$ deve ser substituído pelo termo $P_{Di}(\Delta, M, K, i)$, definido na Equação 4.75. Já o custo esperado de manutenção para esse cenário é expresso de acordo com a Equação 4.76, e o tamanho esperado do ciclo é dado pela Equação 4.77.

$$P_{Di}(\Delta, M, K, i) = \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) \int_0^{i\Delta-x} f_H(h) [1 - F_Z(x+h-M\Delta)] dh dx \quad (76)$$

$$C_D(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K \left[\left[\alpha(i-1)C_v + (i-1)C_i + C_f \right] P_{Di}(\Delta, M, K, i) \right] \quad (77)$$

$$L_D(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K \left[\int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) \int_0^{i\Delta-x} (x+h) f_H(h) [1 - F_Z(x+h-M\Delta)] dh dx \right] \quad (78)$$

Cenário E: Renovação do componente ocorre em uma falha antes de $M\Delta$, após falso negativo.

Esse cenário se assemelha ao Cenário 7 que foi apresentado na seção 4.3 deste trabalho em que o defeito já estava presente no componente na inspeção anterior, porém ele não foi

detectado, transformando-se em uma falha antes da próxima inspeção. Assim, a probabilidade de que isso ocorra pode ser calculada através da Equação 4.28, sendo que o termo $P_{7i}(\Delta, M, K, i)$ precisa ser substituído por $P_{Ei}(\Delta, M, K, i)$, o qual é calculado através da Equação 4.79. O custo esperado de manutenção para o cenário apresentado é dado pela Equação 4.80, e o tamanho esperado do ciclo é dado pela Equação 4.81.

$$P_{Ei}(\Delta, M, K, i) = \sum_{j=1}^{i-1} \left[\beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1)\Delta-x}^{i\Delta-x} f_H(h) dh dx \right] \quad (79)$$

$$C_E(\Delta, M, K) = \sum_{i=2}^M \left[[\alpha(j-1)C_v + (i-1)C_i + C_f] P_{Ei}(\Delta, M, K, i) \right] \quad (80)$$

$$L_E(\Delta, M, K) = \sum_{i=2}^M \sum_{j=1}^{i-1} \left[\beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1)\Delta-x}^{i\Delta-x} (x+h) f_H(h) dh dx \right] \quad (81)$$

Cenário F: Renovação do componente se dá em uma falha depois $M\Delta$, após falso negativo.

Esse cenário se assemelha ao Cenário 8, o qual foi apresentado no item 4.3 deste trabalho, tendo em conta que o defeito deve ter chegado antes da inspeção anterior e a oportunidade não chegue antes que a falha, a qual ocorre antes da próxima inspeção. A Equação 4.32 apresenta a probabilidade de ocorrência desse cenário, no entanto o termo $P_{8i}(\Delta, M, K, i)$ deve ser substituído pelo termo $P_{Fi}(\Delta, M, K, i)$, que é calculado pela Equação 4.82. As Equações 4.83 e 4.84 apresentam o custo esperado de manutenção em um ciclo e o tamanho esperado do ciclo, respectivamente, para o cenário apresentado.

$$P_{Fi}(\Delta, M, K, i) = \sum_{j=1}^{i-1} \left[\beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1)\Delta-x}^{i\Delta-x} f_H(h) [1 - F_Z(x+h-M\Delta)] dh dx \right] \quad (82)$$

$$C_F(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=M+1}^K \left[[\alpha(j-1)C_v + (i-1)C_i + C_f] P_{Fi}(\Delta, M, K, i) \right] & \text{se } M \geq 1 \\ \sum_{i=M+2}^K \left[[\alpha(j-1)C_v + (i-1)C_i + C_f] P_{Fi}(\Delta, M, K, i) \right] & \text{se } M = 0 \end{cases} \quad (83)$$

$$L_F(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=M+1}^K \sum_{j=1}^{i-1} \left[\beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1)\Delta-x}^{i\Delta-x} (x+h) f_H(h) [1 - F_Z(x+h-M\Delta)] dh dx \right] & \text{se } M \geq 1 \\ \sum_{i=M+2}^K \sum_{j=1}^{i-1} \left[\beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1)\Delta-x}^{i\Delta-x} (x+h) f_H(h) [1 - F_Z(x+h-M\Delta)] dh dx \right] & \text{se } M = 0 \end{cases} \quad (84)$$

Cenário G: No qual a renovação do componente acontece em uma oportunidade, após verdadeiro negativo, estando o componente defeituoso.

Esse cenário se assemelha ao Cenário 9, que foi apresentado na seção 4.3 deste trabalho, em que o defeito e a oportunidade ocorrerão em um mesmo intervalo entre inspeções, sendo que o defeito chega antes que a oportunidade, assim o componente será renovado em uma oportunidade, porém, estará em estado defeituoso. A probabilidade de que isso ocorra é calculada através da Equação 4.39, contudo, o termo $P_{9i}(\Delta, M, K, i)$ precisa ser substituído pelo termo $P_{Gi}(\Delta, M, K, i)$, o qual é apresentado na Equação 4.85 a seguir. O custo de manutenção esperado em um ciclo com as características desse cenário é apresentado na Equação 4.86, enquanto que o tamanho esperado do ciclo é apresentado na Equação 4.87.

$$P_{Gi}(\Delta, M, K, i) = \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) \int_{x-M\Delta}^{(i-M)\Delta} f_Z(z) [1 - F_H(M\Delta + z - x)] dz dx \quad (85)$$

$$C_G(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K \left[[\alpha(i-1)C_v + (i-1)C_i + C_o] P_{Gi}(\Delta, M, K, i) \right] \quad (86)$$

$$L_G(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K \left[\int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) \int_{x-M\Delta}^{(i-M)\Delta} (M\Delta + z) f_Z(z) [1 - F_H(M\Delta + z - x)] dz dx \right] \quad (87)$$

Cenário H: em que a renovação do componente ocorre também em uma oportunidade, após verdadeiro negativo, estando o componente bom.

Esse cenário é semelhante ao Cenário 10 apresentado no item 4.3 anteriormente nesse trabalho. Dessa maneira, o defeito chegará ao componente apenas após a oportunidade, o que faz com que o componente seja renovado estando ele em estado bom. A probabilidade de que isso ocorra é calculada pela Equação 4.43, todavia é preciso que o termo $P_{10}(\Delta, M, K, i)$ dessa equação seja substituído pelo termo $P_{Hi}(\Delta, M, K, i)$, o qual é apresentado a seguir pela Equação 4.88. A Equação 4.89 apresenta o cálculo para o custo esperado de manutenção em um ciclo e a Equação 4.90 apresenta o cálculo para o tamanho do ciclo esperado, ambas para o Cenário H apresentado.

$$P_{Hi}(\Delta, M, K, i) = \int_{(i-1-M)\Delta}^{(i-M)\Delta} f_Z(z) [1 - F_X(M\Delta + z)] dz \quad (88)$$

$$C_H(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K [\alpha(i-1)C_v + (i-1)C_i + C_o] P_{Hi}(\Delta, M, K, i) \quad (89)$$

$$L_H(\Delta, M, K) = \sum_{i=M+1}^K \left[\int_{(i-1-M)\Delta}^{(i-M)\Delta} (M\Delta + z) f_Z(z) [1 - F_X(M\Delta + z)] dz \right] \quad (90)$$

Cenário I: Renovação do componente ocorre em uma oportunidade, após falso negativo.

Esse cenário é semelhante ao Cenário 11 apresentado anteriormente nesse trabalho, de maneira que o componente seja renovado preventivamente em uma oportunidade estando ele defeituoso, pois o defeito deve ter chegado antes da inspeção anterior. A probabilidade de que o componente seja renovado em uma oportunidade depois de um falso negativo é dada pela Equação 4.47, porém o termo $P_{11i}(\Delta, M, K, i)$ deve ser substituído pelo termo $P_{Hi}(\Delta, M, K, i)$, o qual é definido pela Equação 4.91 a seguir. As Equações 4.92 e 4.93 apresentam o custo esperado de manutenção no ciclo referente ao cenário apresentado e o tamanho esperado do ciclo, respectivamente.

$$P_{Hi}(\Delta, M, K, i) = \sum_{j=1}^{i-1} \left[\beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1-M)\Delta}^{(i-M)\Delta} f_Z(z) [1 - F_H(M\Delta + z - x)] dz dx \right] \quad (91)$$

$$C_i(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=M+1}^K [\alpha(j-1)C_v + (i-1)C_i + C_o] P_{Hi}(\Delta, M, K, i) & \text{se } M \geq 1 \\ \sum_{i=M+2}^K [\alpha(j-1)C_v + (i-1)C_i + C_o] P_{Hi}(\Delta, M, K, i) & \text{se } M = 0 \end{cases} \quad (92)$$

$$L_i(\Delta, M, K) = \begin{cases} \sum_{i=M+1}^K \sum_{j=1}^{i-1} \left[\beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1-M)\Delta}^{(i-M)\Delta} (M\Delta + z) f_Z(z) [1 - F_H(M\Delta + z - x)] dz dx \right] & \text{se } M \geq 1 \\ \sum_{i=M+2}^K \sum_{j=1}^{i-1} \left[\beta^{i-j} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} f_X(x) \int_{(i-1-M)\Delta}^{(i-M)\Delta} (M\Delta + z) f_Z(z) [1 - F_H(M\Delta + z - x)] dz dx \right] & \text{se } M = 0 \end{cases} \quad (93)$$

Cenário J: Renovação do componente no limite de vida, com o componente defeituoso.

Esse Cenário se assemelha ao Cenário 12, apresentado na seção 4.3 deste trabalho. Assim, o componente será renovado preventivamente no limite de vida, porém, o defeito deve ter chegado em algum momento durante o ciclo, sendo que a probabilidade de que isso ocorra é dada pela Equação 4.94 a seguir, já o tamanho do ciclo esperado é calculado através das

Equações 4.56, de maneira que o termo $P_{12}(\Delta, M, K, i)$ seja substituído pelo termo $P_J(\Delta, M, K, i)$, sendo que o custo esperado de manutenção para esse ciclo nesse cenário é apresentado na Equação 4.95.

$$P_J(\Delta, M, K) = \sum_{i=1}^K \left[\beta^{K-i} [1 - F_Z((K-M)\Delta)] \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f_X(x) [1 - F_H(K\Delta - x)] dx \right] \quad (94)$$

$$C_J(\Delta, M, K) = [\alpha(i-1)C_v + (K-1)C_i + C_p] P_J(\Delta, M, K) \quad (95)$$

Cenário K: Renovação do componente se dá no limite de vida, com o componente bom,

Durante todo o ciclo de vida do componente não ocorreu defeito, nem falha, nem oportunidade. Esse cenário se assemelha ao Cenário 13, apresentado no item 4.3 deste trabalho e, por isso, a Equação 4.59 pode ser utilizada para calcular o tamanho do ciclo esperado para esse cenário, porém, nesse momento é preciso substituir o termo $P_{13}(\Delta, M, K, i)$ pelo termo $P_K(\Delta, M, K, i)$, que representa a probabilidade que o componente seja renovado no limite de vida, estando ele bom (Equação 4.96 a seguir). E o custo esperado de manutenção no ciclo é dado pela Equação 4.97.

$$P_K(\Delta, M, K) = [1 - F_X(K\Delta)] [1 - F_Z((K-M)\Delta)] \quad (96)$$

$$C_K(\Delta, M, K) = (\alpha(i-1)C_v + (K-1)C_i + C_p) P_K(\Delta, M, K) \quad (97)$$

O objetivo da proposição dessa modificação, é identificar qual o impacto para o custo de manutenção e para o intervalo médio entre falhas operacionais considerando haver penalidade por um erro na identificação de um defeito, atribuindo um custo extra para a verificação necessária. Além disso, verificar como o falso positivo e o falso negativo influenciam na tomada de decisão quanto à determinação das variáveis de decisão ótimas para o modelo.

Pode-se então calcular o custo esperado para a manutenção em um ciclo por unidade de tempo, apresentado na Equação (4.98), o qual será minimizado a fim de encontrar os melhores valores para as variáveis de decisão do modelo sem renovação no falso positivo.

$$C'_{\infty}(\Delta, M, K) = \frac{E\{C'(\Delta, M, K)\}}{E\{L'(\Delta, M, K)\}} \quad (98)$$

Em que $E\{C'(\Delta, M, K)\}$ é a soma dos custos esperados de manutenção para os cenários A a K do modelo sem renovação no falso positivo, calculado através das equações apresentadas anteriormente. Enquanto que $E\{L'(\Delta, M, K)\}$ se trata da soma do tamanho esperado do ciclo para os cenários A a K, também apresentados anteriormente.

Como medida de confiabilidade do sistema, também é calculado para esse modelo o tempo médio entre falhas operacionais (MTBOF). Seu cálculo é realizado através da Equação 4.99.

$$MTBOF'(\Delta, M, K) = \frac{E\{L'(\Delta, M, K)\}}{P'_{falha}(\Delta, M, K)} \quad (99)$$

Em que $P'_{falha}(\Delta, M, K)$ se trata da soma das probabilidades de renovação do componente mediante uma falha para o modelo em que não há renovação em um falso positivo, as quais foram definidas nos Cenários C, D, E, e F.

4.6.1 Aplicação numérica do modelo modificado

Alguns parâmetros terão o mesmo valor do que para a aplicação do modelo original, enquanto outros precisam ter seus valores adaptados para representar as características de uma substituição híbrida entre equipe local e uma equipe especializada. Dessa forma, a Tabela 6 apresenta os valores que serão utilizados para o desenvolvimento da aplicação numérica do modelo modificado.

Neste caso, a manutenção é híbrida, em que a equipe local realiza as ações de inspeção e a OEM realiza as ações de substituição. Dessa forma, não se tem a substituição de um componente em um falso positivo, pois quando a equipe de manutenção local encontra um defeito, a OEM é chamada e realiza uma verificação no componente. Se ele estiver no estado defeituoso, será substituído. Caso contrário, apenas um custo adicional de chamar a equipe especializada será contabilizado (C_v).

Tabela 6 – Valores utilizados para a aplicação numérica para o modelo de minimização do custo modificado.

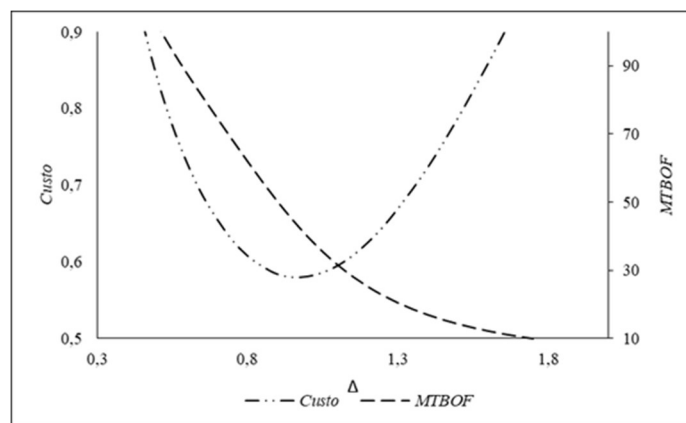
Parâmetro	Descrição	Valores*
α	Probabilidade de ocorrência de falso positivo	0,1
β	Probabilidade de ocorrência de falso negativo	0,2
b_w	Parâmetro de forma da chegada do defeito (componente fraco)	2,5
η_w	Parâmetro de escala da chegada do defeito (componente fraco)	0,8
b_s	Parâmetro de forma da chegada do defeito (componente forte)	5
η_s	Parâmetro de escala da chegada do defeito (componente forte)	3,6
λ_z	Taxa de chegada de oportunidade	2
μ_H	Parâmetro para o cálculo da chegada de falha	1
p	Parâmetro de mistura da amostra	0,05
C_p	Custo de substituição preventiva em uma inspeção	1,00
C_f	Custo de substituição do componente na falha	7,5
C_o	Custo de substituição em uma oportunidade	0,80
C_i	Custo de inspeção	0,03
C_v	Custo pelo chamado da OEM	0,3

Fonte: A Autora (2019).

*O tempo é dado em anos.

A Figura 22 apresenta o comportamento da taxa de custo por unidade de tempo ($C'_\infty(\Delta, M, K)$) e do Tempo médio entre falhas operacionais ($MTBOF'(\Delta, M, K)$) para os valores ótimos de M e K para essa aplicação numérica. Para a minimização da taxa de custo por unidade de tempo, são encontrados os valores ótimos para as variáveis de decisão do modelo: o tempo entre inspeções é 0,97, o limite para ocorrência de oportunidade é $M=2$, e o número máximo de inspeções $K=3$. A partir desses valores é calculado o MTBOF que resultou em 42,75.

Figura 22 – Comportamento da taxa de custo por unidade de tempo e do MTBOF para o modelo de minimização do custo modificado.



Fonte: A Autora (2019).

Esses resultados apresentam um comportamento mediano entre os casos apresentados para o modelo original, em que tanto a taxa de custo por unidade de tempo quanto o MTBOF possuem valores intermediários entre os Casos 1 e 2 apresentados no item 4.4.

Tendo os valores ótimos, foram então realizadas algumas modificações nos parâmetros de maior interesse para o modelo, conforme serão apresentados e discutidos a seguir. A

mostra variações para os parâmetros de falso positivo e falso negativo, assim como os valores ótimos para as variáveis de decisão e para os critérios de decisão para as situações em que há e não há ignorância quanto a definição dos parâmetros dos erros.

Observa-se um comportamento semelhante ao já apresentado anteriormente na análise do modelo original, no qual à medida em que a probabilidade de ocorrência de falso positivo aumenta, a frequência das inspeções aumenta e para o verdadeiro positivo se verifica o oposto. Porém, para o modelo adaptado a taxa de custo por unidade de tempo é mais elevada do que no Caso 1 do modelo original, mas o MTBOF também é mais alto para todas as análises avaliadas, tal que em nenhuma das avaliações ele foi menor que 40.

Tabela 7 – Variação para os parâmetros de falso positivo e falso negativo para o modelo de minimização do custo modificado

Parâmetros		Valores ótimos para as variáveis de Decisão			Valores para os critérios de decisão				Diferença no Custo (%)	Diferença no MTBOF (%)
α	β	A	M	K	Sem ignorância C'_∞	Com ignorância $MTBOF'$	Sem ignorância C'_∞	Com ignorância $MTBOF'$		
0,1	0,2	0,970	2	3	0,5797	42,75	0,6011	51,21	3,69	19,79
0,15	0,2	0,976	2	3	0,5920	42,16	0,6267	51,21	5,86	21,47
0,2	0,2	0,982	2	3	0,6041	41,58	0,6523	51,21	7,98	23,16
0,05	0,2	0,963	2	3	0,5674	43,45	0,5754	51,21	1,41	17,86
0	0,2	0,686	3	4	0,5509	48,69	0,5498	51,21	-0,20	5,18
0,1	0,25	0,968	2	3	0,5833	41,76	0,6058	48,94	3,86	17,19
0,1	0,3	0,966	2	3	0,5868	40,81	0,6107	46,80	4,07	14,68
0,1	0,15	0,972	2	3	0,5762	43,77	0,5965	53,60	3,52	22,46
0,1	0,1	0,974	2	3	0,5727	44,86	0,5921	56,14	3,39	25,14
0,1	0,05	0,976	2	3	0,5693	45,98	0,5878	58,83	3,25	27,95
0,1	0	0,978	2	3	0,5658	47,15	0,5837	61,69	3,16	30,84
0	0	0,514	4	6	0,5323	61,93	-	-	-	-
0	0,05	0,512	4	6	0,5364	59,46	0,5364	58,83	0,00	-1,06
0	0,1	0,509	4	6	0,5407	57,64	0,5331	61,11	-1,41	6,02
0	0,15	0,507	4	6	0,5450	55,59	0,5335	60,82	-2,11	9,41
0	0,3	0,500	4	6	0,5588	50,18	0,5348	59,95	-4,29	19,47
0,05	0	0,701	3	4	0,5533	53,24	0,558	61,69	0,85	15,87
0,15	0	0,985	2	3	0,5780	46,34	0,6094	61,69	5,43	33,12
0,2	0	0,991	2	3	0,5901	45,66	0,6351	61,69	7,63	35,11
0,3	0	1,004	2	3	0,6140	44,22	0,6866	61,69	11,82	39,51
0,2	0,3	0,978	2	3	0,6113	39,72	0,6619	46,8	8,28	17,82

Fonte: A Autora (2019).

A menor taxa de custo foi verificada para o caso em que $\alpha=\beta=0$, com valor igual a 0,5323, e o menor MTBOF averiguado foi para $\alpha=0,1$ e $\beta=0,3$ com valor igual a 40,81. Já era esperado que a taxa de custo fosse maior que o Caso 1 do modelo original, uma vez que é uma política híbrida e considera os valores da OEM para realizar as ações de substituição. Da mesma forma,

era esperado que o MTBOF fosse maior, pois a qualidade da manutenção é mais elevada, com $p=0,05$.

Na Tabela 8 é possível encontrar uma variação para o parâmetro da qualidade da manutenção para o caso híbrido, ao qual, à medida em que a qualidade diminui ($\uparrow p$), a quantidade de inspeções aumenta, o intervalo entre inspeções diminui, aumentando a taxa de custo e diminuindo o MTBOF. Assim como uma avaliação do parâmetro relacionado à chegada de oportunidade no sistema e bastante semelhante ao comportamento apresentado pelos casos 1 e 2 do modelo original. Quando se tem maior frequência de chegada de oportunidade, o modelo busca aumentar a janela de oportunidade para considerá-la, aumentando de 0,970 para 1,026. Além de que a taxa de custo por unidade de tempo fica inferior ao caso base, e o MTBOF aumenta.

Observa-se comportamento semelhante aos resultados do modelo original quando se analisa a existência de ignorância frente a definição dos valores para as variáveis de decisão. Isso se dá quando os valores das probabilidades de ocorrência do falso positivo e do falso negativo não são os que são observados no componente. Pode-se verificar como que a não consideração da existência de erros, quando na verdade eles estão presentes, afeta os resultados. Está-se referindo ao caso $\alpha=\beta=0$. A taxa de custo de manutenção por unidade de tempo se torna maior, assim como o MTBOF, porque esse último está relacionado diretamente ao intervalo entre as inspeções, o qual é diminuído para essa política ótima.

Tabela 8 – Variação de alguns parâmetros da aplicação numérica do modelo de minimização do custo modificado.

Parâmetros			Valores ótimos para as variáveis de Decisão			Valores para os critérios de decisão	
p	C_v	λ_z	A	M	K	C'_∞	$MTBOF'$
0,05	0,3	2	0,970	2	3	0,5797	42,75
0,1			0,708	3	4	0,6536	33,47
0,15			0,566	4	5	0,7204	28,95
0			1,734	1	2	0,4999	65,06
			0,972	2	3	0,5903	42,56
	0,4	0,2	0,967	2	3	0,5692	43,05
	0,2		0,966	2	3	0,5639	43,15
	0,15		0,693	3	4	0,5570	47,43
	0,1		0,692	3	4	0,5496	47,61
	0,05		0,899	2	3	0,5962	42,45
		3	1,026	2	3	0,5698	43,67

Fonte: A Autora (2019).

Do ponto de vista da confiabilidade, esse modelo híbrido é mais indicado do que o Caso 1 apresentado no item 4.4. No entanto, do ponto de vista do custo, não. Dessa maneira, a Tabela 8 também apresenta uma variação no parâmetro referente ao valor pago para a OEM a cada

chamado para verificar a existência de defeito no componente. Apesar de reduzir esse valor, o custo permanece ainda superior ao Caso 1, no entanto, o MTBOF passa a ser o melhor entre as três opções, quando o valor de C_v cai para um patamar bastante baixo, igual a 0,1.

Uma outra análise interessante é fazer a melhora das ações de manutenção da equipe local mediante o acréscimo de um dado custo, apresentada na

Tabela 9.

Tabela 9 – Avaliação na melhoria da qualidade da manutenção e inspeção da equipe local.

Caso	Aplicação	Parâmetros							Valores ótimos para as variáveis de Decisão			Valores para os critérios de decisão	
		β	α	p	C_p	C_i	C_f	C_o	A	M	K	C_∞	$MTBOF$
Caso 1	1	0,1	0,2	0,12	1	0,03	5	0,5	1,022	2	4	0,5108	24,06
	2	0,08	0,15	0,09	1,1	0,033	5,5	0,55	1,009	2	4	0,5088	29,79
	3	0,05	0,1	0,05	1,4	0,042	7	0,7	0,97	2	4	0,5593	42,24
Caso 2	4	0	0	0,05	1	0,09	7,5	0,8	0,997	2	3	0,5830	44,99
Caso 3	5	0,1	0,2	0,05	1	0,03	7,5	0,8	0,970	2	3	0,5797	42,75
	6	0,08	0,15	0,05	1	0,045	7,5	0,8	0,975	2	3	0,5840	43,48
	7	0,05	0,1	0,05	1	0,06	7,5	0,8	0,938	2	3	0,5732	48,87

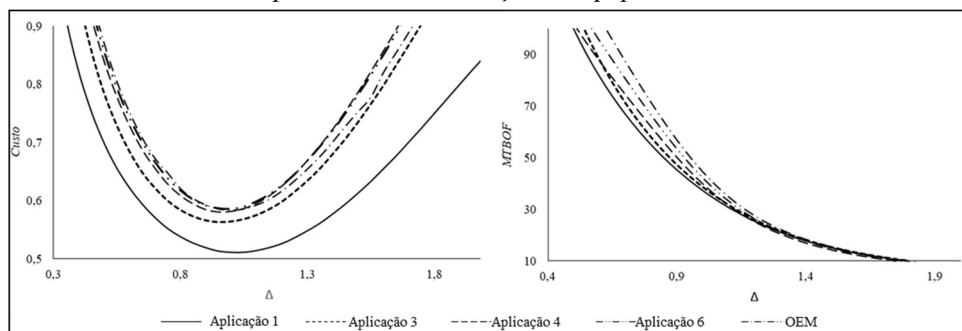
Fonte: A Autora (2019).

Pode-se verificar, então, na

Tabela 9 uma avaliação para o Caso 1, que trata da aplicação do modelo original em que a Equipe Local realiza todas as ações de manutenção, e o Caso 3 descrito anteriormente. Aumentando em 40% o custo da manutenção preventiva, refletindo esse aumento nos demais custos observa-se que a confiabilidade do componente se aproxima da confiabilidade do Caso 2 em que a OEM realiza todas as ações, enquanto que a taxa de custo esperada de manutenção se mantém abaixo.

Uma avaliação visual do comportamento da taxa de custo de manutenção e do MTBOF, mediante alterações na qualidade da manutenção, pode verificada na Figura 23. Um aumento de 100% no custo de inspeção do Caso 3 proporciona o acréscimo de confiabilidade, ultrapassando a confiabilidade do Caso 2, e a taxa de custo permanece inferior. Esse decréscimo na taxa de custo ocorre pela redução de chamada da equipe OEM para comprovar a existência de defeito no componente, pois β cai pela metade. Dessa forma, parece oportuno que o gestor de manutenção proporcione esse aumento da qualidade das inspeções, para tornar o sistema mais confiável e que a utilização de uma equipe híbrida possa ser uma boa opção.

Figura 23 – Comportamento das funções da taxa de custo por unidade de tempo e MTBOF mediante melhoria da qualidade de manutenção da equipe Local.



Fonte: A Autora (2019).

Dessa forma, o modelo híbrido seria indicado quando se busca uma maior confiabilidade do sistema, a um custo inferior do que só realizar manutenção com a OEM, principalmente se alguma barganha for realizada para melhorar o custo da chamada da OEM para realização de inspeção para detectar o falso positivo.

4.7 Síntese conclusiva do capítulo

O presente Capítulo teve como intuito apresentar o desenvolvimento de um modelo analítico para a manutenção de um sistema monocomponente sujeito à manutenção oportuna e baixa qualidade na ação de inspeção. Além disso, o processo de chegadas de falhas do componente é modelado de acordo com o modelo de *delay-time*, e o processo de chegadas do defeito e da falha, de acordo com distribuição exponencial.

O capítulo foi organizado da seguinte maneira: primeiramente foram apresentadas as características do componente envolvido, posteriormente uma explanação sobre as possíveis formas de renovação do componente através da identificação de 13 diferentes cenários. A criação desses cenários foi necessária para avaliar exhaustivamente todas as possíveis formas de renovação do componente através de uma falha, oportunidade ou ação preventiva. A partir da construção desses cenários, foi possível desenvolver as equações para o cálculo da taxa de custo por unidade de tempo e o intervalo médio entre falhas operacionais. Uma aplicação numérica foi então apresentada com o intuito de identificar o comportamento dos parâmetros do modelo frente à otimização das variáveis de decisão do modelo.

Tal desenvolvimento enfatiza a utilização de probabilidades relacionadas a falso positivo e falsos negativos no momento da realização da inspeção, e se preocupou em analisar o impacto

apresentado pela utilização dessas probabilidades. Em seguida, foi proposta uma adaptação ao modelo original, a qual considera que a existência de falso positivo não renova o sistema, pois quando uma inspeção for positiva, uma nova verificação será feita no componente por uma equipe especializada (OEM), mediante um custo adicional.

Assim, foi possível identificar que a possibilidade de ocorrência de erros nas inspeções afeta significativamente os resultados, tanto nas variáveis de decisão envolvidas no modelo, quanto na minimização da taxa de custo por unidade de tempo ótima para a política desenvolvida. Ou seja, comparando os resultados para o modelo que não leva em consideração os erros, observou-se que a taxa de custo por unidade de tempo quando se tem erros é maior do que quando não se tem, o que já era esperado. Ademais, o tempo entre inspeções ótimo é decrescido quando não existe a possibilidade de erros.

A partir da comparação dos Casos 1 (apenas ações de manutenção da equipe local) e 2 (ações de manutenção de uma OEM) para o modelo original, ficou clara a participação dos parâmetros relacionados à qualidade tanto da inspeção quanto da manutenção seja relacionado à taxa e custo de manutenção esperada, ou com o MTBOF. De maneira que, no Caso 1, no qual há ambos os erros, a confiabilidade do sistema fica muito reduzida, apesar de os custos serem mais baratos. Enquanto o modelo que não considera possibilidade de erro na inspeção, as ações de manutenção são mais caras, por serem realizadas por uma equipe especializada.

Comparando-se os dois modelos propostos no presente capítulo, é possível identificar que, embora exista um custo adicional para chamar a OEM para atestar a existência do defeito para o segundo modelo, a taxa de custo de manutenção por unidade de tempo é inferior quando comparado ao modelo original, além do que, a confiabilidade (MTBOF) para o segundo modelo se apresenta maior do que para o modelo original. Em contrapartida, observam-se algumas reações semelhantes para o modelo, por exemplo, quando a qualidade da manutenção é reduzida, observa-se um decaimento do MTBOF do componente.

Cabe ao gestor de manutenção decidir qual será a prioridade do sistema, para identificar o tipo de contrato que irá reger as ações de manutenção, escolhendo entre melhor custo ou melhor confiabilidade. Assim, várias considerações foram feitas acerca dos parâmetros do modelo, comparando seu desempenho para ambos os modelos desenvolvidos através da análise de sensibilidade da aplicação numérica, de forma que algumas opções de melhoria para a qualidade das ações de manutenção da equipe local possam ser avaliadas.

5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO

O presente capítulo apresenta o desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão multicritério, através da utilização das equações referentes ao cálculo da Taxa de Custo de manutenção por unidade de tempo e do Intervalo Médio Entre Falhas Operacionais (MTBOF), apresentadas no item 4.3 deste trabalho. Primeiramente, é descrito o problema de decisão, em que uma contextualização da relação de modelo multicritério com o problema de manutenção é apresentada. Posteriormente, os passos para o desenvolvimento do modelo de decisão são expostos, os quais são, em seguida, aplicados em um caso numérico para analisar os efeitos que a avaliação multicritério possui frente aos critérios analisados.

5.1 Motivação para o desenvolvimento do modelo multicritério

Modelos de manutenção têm sido desenvolvidos desde muito tempo, sendo publicados diversos artigos com definições de maneiras de programar e otimizar a manutenção em diversos setores. Todos destacam a importância de se realizar o planejamento da manutenção, que pode impactar na diminuição do custo, aumento da qualidade dos produtos/serviços, aumentar a disponibilidade do sistema, aumentando a confiabilidade e os requisitos de segurança do sistema. Para Van Der Weide, Pandey e Noortwijk (2010), apesar da diversidade dos impactos esperados com a programação da manutenção, a maioria dos trabalhos publicados utiliza uma análise restrita à minimização do custo de manutenção.

De acordo com De Almeida, Ferreira e Cavalcante (2015), os pesquisadores começaram a entender que, para planejamento de manutenção, a análise precisa ir mais além do que apenas as consequências de incrementos de custos. Em alguns contextos essa avaliação pode ser inadequada, como citado pelos autores, por exemplo, na manutenção de equipamentos hospitalares, proteção da segurança militar de um país, ou na operação de um sistema de distribuição de petróleo, nos quais as consequências de falhas poderiam ser catastróficas.

Cavalcante, Alencar e Lopes (2017) afirmam que existe uma lacuna nos modelos de manutenção que utilizam multicritério para avaliação e, postulam que esta é uma área menos explorada. Esse fato pode ser verificado especialmente em modelos de manutenção oportuna, e que consideram erros durante a execução da manutenção.

Além disso, Bouyssou (1993) afirma que a utilização de métodos multicritério como forma de auxiliar na tomada de decisão proporciona algumas vantagens, tais como desenvolver uma base de diálogo para diferentes atores do processo de tomada de decisão, incorporação de preferências do decisor, e a possibilidade de considerar diferentes objetivos para a solução do problema, mesmo que possam existir conflitos entre eles.

Assim, ao observar os capítulos 2 e 3 desse trabalho, pode-se perceber que o número de trabalhos que utilizam a avaliação de mais de um fator para a programação da manutenção na área de manutenção oportuna e inspeção imperfeita é pequeno. Em sua maioria, os trabalhos buscam otimizar o custo de manutenção, ou o custo de produção quando adicionam o custo de manutenção ao custo de produção. Assim como os trabalhos que apresentam a utilização de inspeção imperfeita, em que na sua grande maioria apresentam apenas a maximização de um fator importante para o problema.

Isso evidencia a necessidade de desenvolver um modelo que possa avaliar mais de um fator ao mesmo tempo, tendo em vista que vários autores afirmam ser importante para a área de manutenção a avaliação de diferentes fatores. Outrossim, a utilização de um método multicritério de apoio à decisão permite incluir no processo decisório a visão do decisor frente ao problema, em que as preferências dele serão levadas em conta para desenvolver o modelo de decisão.

Além dessas questões expostas, a partir do desenvolvimento das aplicações numéricas do Capítulo 4 foi possível identificar que existe certa dificuldade em definir a seleção da melhor equipe para realizar as ações de manutenção. Ou mesmo, avaliar possibilidades de diferentes formas de contratos entre equipe local e equipe especializada. A utilização de método de apoio à decisão multicritério pode contribuir nesse ponto, identificando, a partir das necessidades do sistema e das características do decisor, qual a melhor equipe de manutenção para realizar as ações de manutenção, além de definir os valores para a política ótima.

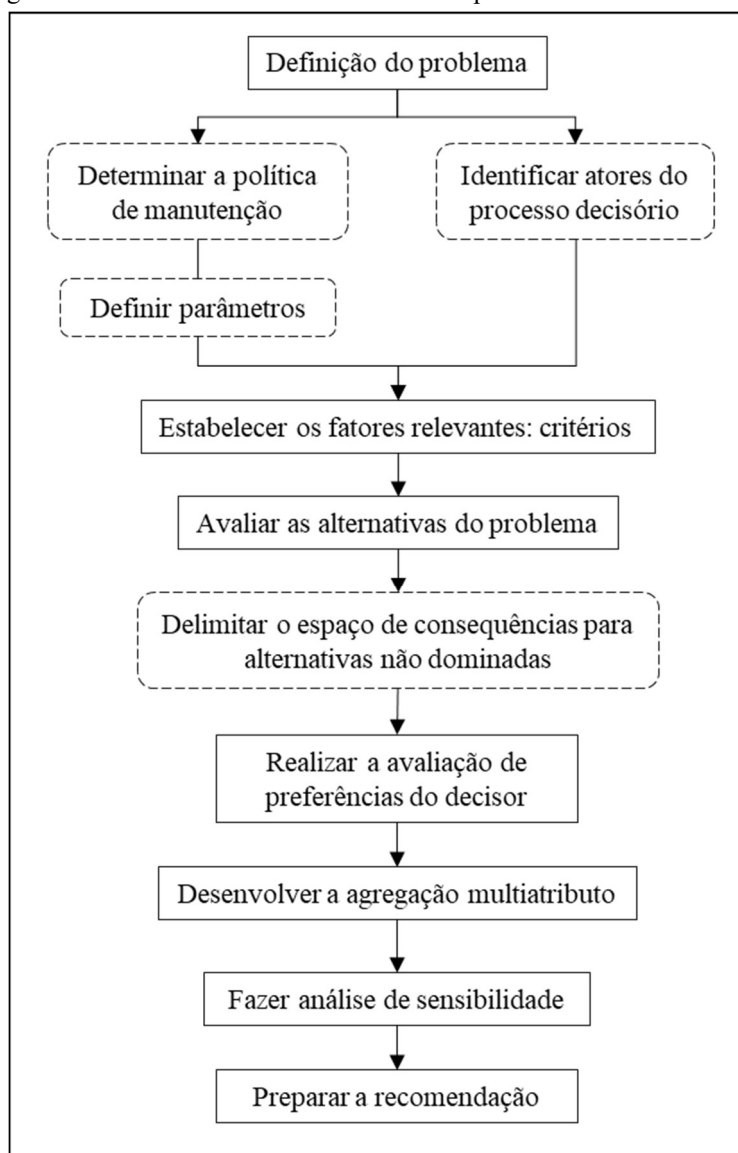
5.2 Desenvolvimento do modelo multicritério

O modelo de decisão multicritério será desenvolvido através do embasamento teórico proposto por Keeney e Raiffa (1976), De Almeida (2013) e De Almeida *et al.* (2015). As etapas para o desenvolvimento do modelo são descritas da Figura 24, as quais compreendem: Definição do problema; Estabelecer os fatores relevantes: critérios; Avaliar as alternativas do

problema; Realizar a avaliação de preferência do decisor; Desenvolver a agregação multiatributo; Fazer análise de sensibilidade; Preparar a recomendação.

Será utilizado o MAVT (*Multi-criteria Value Theory* – Teoria de Valor Multicritério) para desenvolver o modelo de apoio à decisão multicritério. Essa teoria é conhecida como critério único de síntese, em que a agregação dos critérios é realizada em uma única função global. Essa classe de métodos é compensatória, na qual diferenças de performance entre os critérios são compensadas através de *trade-off* entre os mesmos. A escolha do MAVT se deu pelo fato de que não são considerados no problema estados da natureza, ou seja, todos os valores dos parâmetros são conhecidos, não necessitando de uma avaliação probabilística.

Figura 24 – Desenvolvimento do modelo de apoio à decisão multicritério.



Fonte: A Autora (2019).

De acordo com Cavalcante e Lopes (2014), uma forma de avaliar os *trade-offs* entre os critérios é através da utilização de funções valores, de maneira que *trade-offs* estejam relacionados aos julgamentos do decisor em relação aos critérios e que, juntamente com a função valor, ajudem o decisor a formalizar seus julgamentos frente aos critérios. Cada ponto no espaço de consequências pode ser associado a um valor real, que reflete a preferência do decisor em relação às consequências, em que uma função valor global pode ser maximizada para encontrar o melhor valor para as variáveis de decisão do modelo, proporcionando comparações entre os critérios.

5.2.1 Descrição do problema

Essa etapa tem como finalidade proporcionar o conhecimento do problema, assim como todas as variáveis que podem influenciar no processo decisório e também entender os atores que farão parte desse processo. Para o presente modelo, o problema trata-se da definição de uma estratégia de manutenção, que ao ser adotada pelo tomador de decisão, irá trazer as melhores consequências para todo o sistema envolvido. Nesse sentido, fala-se de um modelo de manutenção cujas características já foram detalhadamente apresentadas no item 4.3 desse trabalho, mas que serão resumidamente apresentadas a seguir para melhor compreender o processo que se está desenvolvendo nesse momento, através da apresentação de algumas hipóteses assumidas para o seu desenvolvimento:

1. *A política de manutenção é oportuna.*

Esse tipo de política utiliza ações preventivas e corretivas para manter ou reestabelecer a operação do sistema. O componente analisado utiliza-se de paradas provenientes dos demais componentes do sistema para realizar manutenção preventiva, sendo que essas paradas podem ser provenientes de manutenção preventiva ou corretiva, ou ainda devido ações externas ao sistema.

2. *O sistema é monocomponente.*

O modelo leva em consideração apenas um componente, que não possui dependência estocástica com os demais componentes/equipamentos do sistema. Porém, ele pode ser parte de um sistema complexo, em que os demais componentes forneçam as oportunidades de manutenção.

3. *O componente pode visitar três estados, que representam o seu processo de falha.*

O primeiro é o estado bom, em que se está operando dentro da normalidade esperada. O segundo é o estado defeituoso, no qual em algum momento do tempo ocorre um defeito no

componente, o que o deixa operando, porém não em condições normais, podendo ocasionar por exemplo, menor eficiência, produzir itens defeituosos, aumentar o custo. O terceiro estado se trata do estado falho, que causa a parada do sistema.

4. O tempo transcorrido da chegada do defeito até a falha é modelado pelo delay-time.

5. O estado defeituoso é apenas identificado mediante ações de inspeção

As inspeções ocorrem em intervalos de tempo periódicos (Δ) ao longo do ciclo de vida do componente a cada $i\Delta$ ($i=1, \dots, K-1$). Em K , o componente não é inspecionado, pois, nesse momento, já há uma substituição preventiva programada.

6. A falha é imediatamente pronunciada, pois causa a parada do componente.

7. As inspeções são imperfeitas.

Foi considerado que dois tipos de erros podem ocorrer quando uma ação de inspeção for executada: A. falso positivo, quando o componente está bom, porém na inspeção ele é diagnosticado como defeituoso; B. falso negativo, quando o componente está defeituoso, mas em uma inspeção é dito que o componente está bom. Ambos os erros possuem probabilidades de ocorrência que são levadas em consideração na modelagem do problema.

8. A chegada do defeito, da falha e da oportunidade é representada por variáveis aleatórias X , H e Z , respectivamente, sendo probabilisticamente independentes.

9. A qualidade da manutenção pode variar.

Isso significa que o componente é proveniente de uma população mista, em que p representa o parâmetro de mistura da população, composta por itens fortes e itens fracos.

O componente pode ser renovado, o que ocorrer primeiro:

- A. em uma falha;
- B. em uma inspeção;
- C. em uma oportunidade;
- D. no final do ciclo de vida ($K\Delta$).

Dessa forma o modelo possui três variáveis de decisão:

1. Δ , que é o intervalo de tempo entre inspeções periódicas.
2. M , que trata de um limite mínimo de inspeções para considerar a oportunidade. A oportunidade será considerada apenas quando surgir após a idade $M\Delta$ do componente, o qual será renovado em oportunidade somente após esse limite e um defeito não for encontrado na inspeção e se uma falha não ocorrer antes.
3. K , que representa o tamanho do ciclo de vida do componente $K\Delta$.

Nesta fase, é importante estabelecer os parâmetros e funções que serão necessários para o desenvolvimento do modelo, assim como a definição dos seus valores para quando o modelo for aplicado. Assim, tem-se:

α : Probabilidade de ocorrência de falso positivo;

β : Probabilidade de ocorrência de falso negativo;

$f_X(.)$: Função densidade de probabilidade de chegada do defeito;

$f_H(.)$: Função densidade de probabilidade do *delay-time*;

$f_Z(.)$: Função densidade de probabilidade da oportunidade;

C_i : Custo de realizar inspeção;

C_p : Custo de substituição preventiva em uma inspeção, ou no fim do ciclo de vida do componente;

C_f : Custo de substituição em uma falha;

C_o : Custo de substituição preventiva em oportunidade ($C_o < C_p < C_f$).

Para mais detalhes das características desses parâmetros, pode-se retornar ao Capítulo 4 desse trabalho onde se apresenta detalhadamente essas informações.

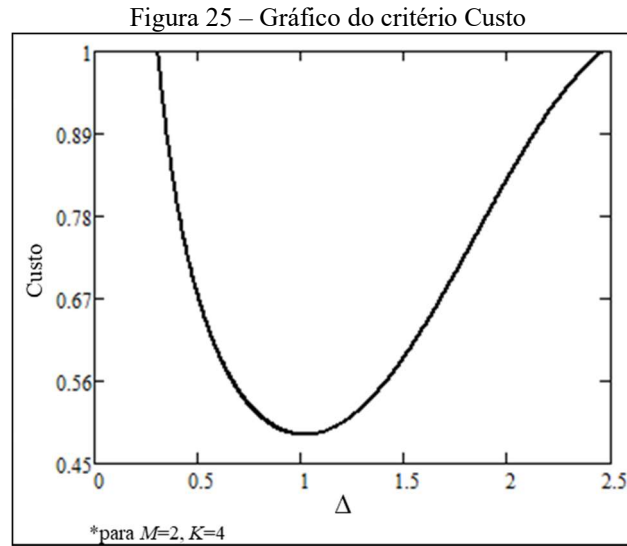
Além do exposto, é necessário definir quem será o tomador de decisão, que também é responsável pelas consequências associadas às decisões tomadas. Em problemas de manutenção, é comum que o gestor de manutenção assuma esse papel na tomada de decisão. Na ausência dessa pessoa, o decisor será o responsável pela tomada de decisões estratégicas do setor de manutenção da empresa.

5.2.2 Estabelecer os fatores relevantes: critérios

Como já mencionado anteriormente, modelos de avaliação de manutenção de diversos tipos de sistemas utilizaram, por muito tempo, apenas a análise de um único fator para realizar a programação da manutenção, o que, em muitos casos, pode não ser o mais adequado, principalmente em se tratando de problemas em que a parada do sistema pode produzir perdas imensuráveis; por exemplo: sistemas dos quais dependem vidas humanas e sistemas com alto impacto ambiental.

O primeiro critério será chamado de Custo, o qual se refere à taxa de custo de manutenção esperada por unidade de tempo, que aqui será representado por C , e que engloba o custo total de manutenção para a política desenvolvida. Um exemplo para esse critério é representado pela Figura 25, em que existe um ponto de mínimo na função que o representa. Este tem sido um dos critérios mais amplamente utilizados na literatura na busca por uma solução ótima de

modelos de manutenção, conforme já apresentado na revisão da literatura desse trabalho, cujo objetivo é encontrar os melhores valores para as variáveis de decisão que minimizem esse critério.



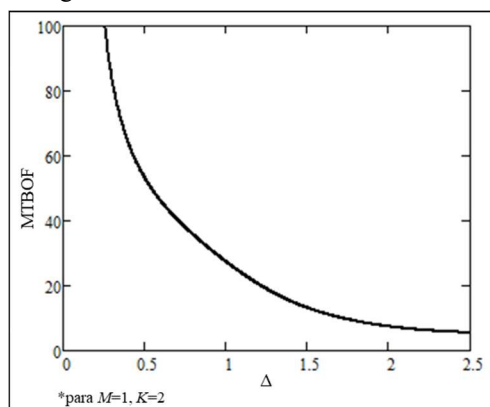
Fonte: A Autora (2019).

Assim, esse critério será calculado através da Equação 5.1, em que $E\{C(\Delta, M, K)\}$ é a taxa de custo esperada para um ciclo, e $E\{L(\Delta, M, K)\}$ é o tamanho esperado do ciclo. Essas grandezas serão calculadas conforme as equações apresentadas no item 4.3, para o modelo original.

$$C = \frac{E\{C(\Delta, M, K)\}}{E\{L(\Delta, M, K)\}} \quad (100)$$

O segundo critério é tempo médio entre falhas operacionais (MTBOF – *Mean Time Between operational failures*), representado pela Figura 26, que é uma medida de confiabilidade do sistema.

Figura 26 – Gráfico do critério MTBOF.



Fonte: A Autora (2019).

Em diversos setores a confiabilidade do sistema é uma medida crucial para determinar o seu bom funcionamento, sendo que conforme sua criticidade aumenta à medida que os impactos que uma falha pode causar também aumentam, principalmente em termos de parada do sistema. Esses impactos nem sempre podem ser traduzidos para avaliação monetária, o que torna esse critério ainda mais importante em uma avaliação de manutenção de um sistema.

À medida que o MTBOF diminui, a confiabilidade do sistema também diminui, pois, o intervalo entre as falhas estaria sendo reduzido, acontecendo o contrário quando o MTBOF aumenta. Esse critério é dependente do tempo entre inspeções, assim como da quantidade de inspeções realizadas durante um ciclo, conforme foi concluído no Capítulo 4, possui um comportamento de uma função monotonicamente decrescente, justamente pelo fato de que, ao se aumentar o intervalo entre inspeções, o equipamento tem uma maior probabilidade de falhas.

Devido a esse comportamento monotônico, os trabalhos publicados na área não utilizam este critério como parte da função objetivo. No entanto, conforme afirmam Cavalcante e Costa (2006) e Scarf *et al.* (2005), ele é utilizado em alguns casos como uma restrição do modelo, enquanto em outros os tomadores de decisão preferem utilizá-lo como um fator para controlar o processo.

Dessa maneira, o critério MFBOF será calculado dividindo o tamanho esperado do ciclo ($E\{L(\Delta, M, K)\}$, calculado através da Equação 4.61) pela probabilidade de ocorrência de falha durante um ciclo ($P_{falha}(\Delta, M, K)$, calculado através da Equação 4.36), conforme apresenta a Equação 5.2.

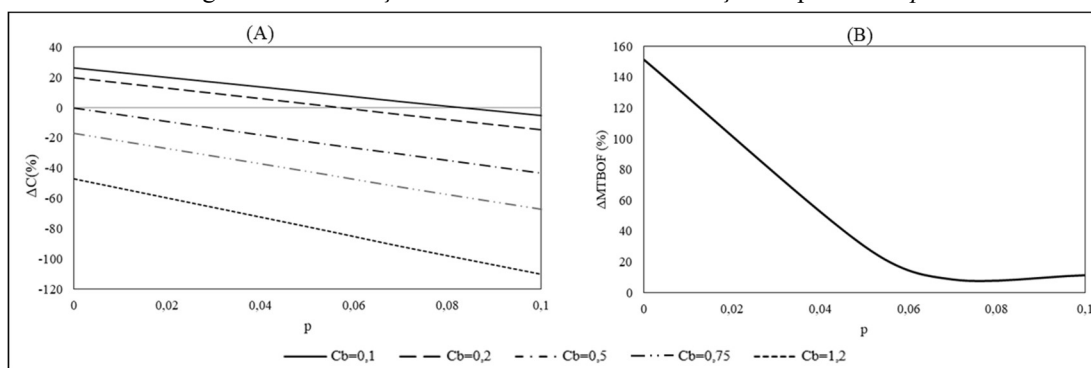
$$MTBOF(\Delta, M, K) = \frac{E\{L(\Delta, M, K)\}}{P_{falha}(\Delta, M, K)} \quad (101)$$

Para enriquecer a análise, serão realizadas algumas avaliações do comportamento dos critérios em relação aos parâmetros de qualidade da manutenção, considerando a variação da taxa esperada de custo de manutenção (ΔC , dado em porcentagem) e do tempo entre falhas operacionais ($\Delta MTBOF$, dado em porcentagem), mediante um custo bônus (Cb). Esse custo tem o significado de que, à medida que se aumenta o custo de manutenção, pode-se ocorrer um aumento na qualidade da manutenção.

Foi escolhido fazer tal avaliação com as melhorias proporcionadas para as ações de manutenção realizadas por uma Equipe Local, conforme apresentado no item 4.4 dessa tese, a qual possui custos de manutenção baixos, porém a qualidade é não é boa.

Primeiramente, uma análise da variação do incremento dos critérios em relação ao parâmetro de qualidade da manutenção p é apresentada na Figura 27. O Caso A da referida Figura apresenta a variação para a taxa de custo, enquanto o valor do eixo das ordenadas for positivo, se compensa fazer um incremento do custo através do custo bônus para melhorar a qualidade da manutenção. Dessa forma, observa-se que para $Cb \geq 0,5$ não há melhoria no custo, mesmo havendo redução de p , ao passo que para $Cb=0,2$ compensa enquanto a melhoria de p é inferior a cerca de 0,6 (que é metade do que apresenta a equipe local) e para $Cb=0,1$ compensa até quando p é igual a aproximadamente 0,8.

Figura 27 – Avaliação dos critérios mediante variação do parâmetro p .



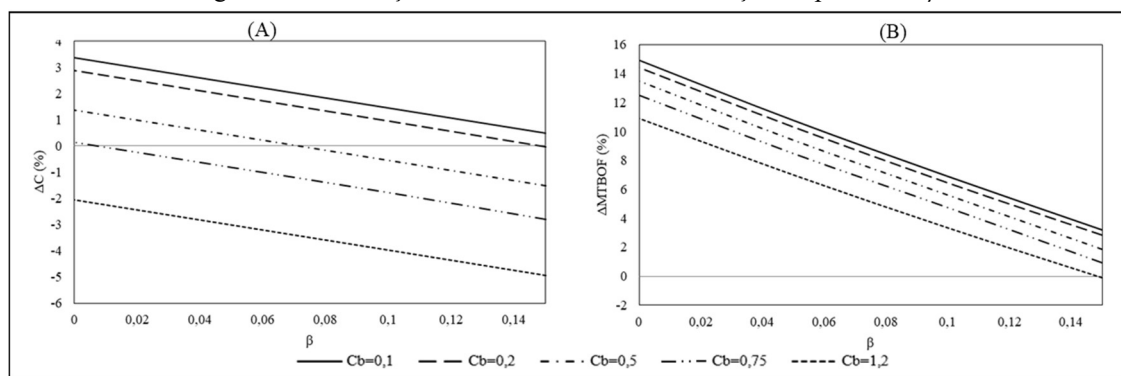
Fonte: A Autora (2019).

O Caso B da Figura 27 apresenta a variação para o critério MTBOF. Nela, é possível identificar que tal critério não é sensível à variação do custo bônus, mas apenas da variação da

qualidade da manutenção. Essa situação pode ser explicada principalmente pelo fato de que, para calcular o MTBOF, é levado em consideração os cenários que apresentam a renovação através de uma falha, o que está relacionado diretamente ao intervalo entre inspeções e não com custo. Tal critério será mais sensível a variações de C_b , quando este, juntamente com a variação da qualidade da manutenção incorrer na alteração do intervalo entre inspeções.

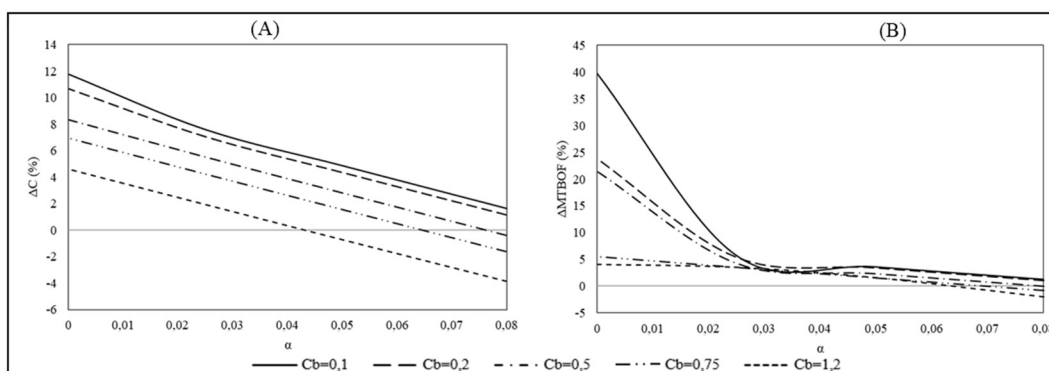
A Figura 28 apresenta a avaliação da variação dos critérios frente alteração na probabilidade de ocorrência de falso negativo (β) nas inspeções. Neste caso, o custo bônus está relacionado a um aumento da qualidade da inspeção, mediante um aumento do custo da realização da inspeção. A interpretação dessa Figura é a mesma da Figura anterior, sendo a variação na porcentagem de incremento de custo e do MTBOF bastante inferior, porém, ainda assim, pode-se considerar uma melhoria da taxa de custo mediante alteração da probabilidade do falso negativo. Assim, não se observa uma avaliação positiva para o custo apenas para quando $C_b=1,2$ e para $C_b=0,75$ a porcentagem é muito baixa para valores mínimos de β . Já para o MTBOF observa-se melhoria no seu valor para todos os valores de C_b . Principalmente quando se reduz a probabilidade de ocorrência de erro, pois nesses casos, há redução no intervalo entre inspeções.

Figura 28 – Avaliação dos critérios mediante alteração do parâmetro β .



Fonte: A Autora (2019).

E, por fim, a Figura 29 apresenta a variação dos critérios mediante um custo bônus na alteração de ocorrência de falso positivo (α). Observa-se que há alterações para ambos os critérios, mesmo que C_b seja o mais alto, tem-se alteração positiva na taxa de custo de manutenção quando $\alpha \leq 0,45$. O MTBOF se apresenta mais sensível com as variações apresentando um incremento em porcentagem superior do que quando se alterou o parâmetro β .

Figura 29 – Comportamento dos critérios mediante alterações do parâmetro α .

Fonte: A Autora (2019).

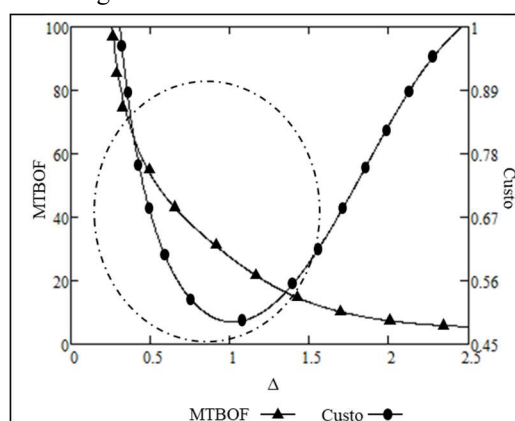
Essas avaliações apresentam um *insight* para fazer a construção das alternativas que serão avaliadas na aplicação numérica, intercalando melhorias nos parâmetros de qualidade com aumentos dos custos de manutenção.

5.2.3 Avaliar as alternativas do problema

Para a avaliação das possíveis alternativas, pode-se proceder a análise das consequências mediante diferentes combinações, para analisar aquelas que são dominadas pelas melhores. Assim, com o estudo dos critérios apresentados anteriormente pode-se perceber que existe certa região de conflito entre eles. Isso é ocasionado pelo fato de que em estudos de sistemas sob a ótica de manutenção espera-se que o Custo de manutenção seja diminuído ao nível mais baixo possível, enquanto para a confiabilidade se espera ter o máximo, ou seja, MTBOF maximizado. Dessa maneira, como se deseja, ao mesmo tempo, maximizar o MTBOF e minimizar o custo e, por eles serem conflitantes, uma avaliação mais subjetiva é necessária, podendo não ser mais uma análise puramente técnica, que prescinde a análise do decisor. A estrutura de preferências do decisor passa a ser um aspecto chave na definição das melhores alternativas de decisão.

A Figura 30 apresenta essa região de conflito, a qual deve ser o foco do estudo, pois de acordo com Vincke (1992) as alternativas que se encontram fora dessa região tendem a ser dominadas pelas alternativas que estão dentro. Dessa forma, o modelo de decisão deve considerar apenas as alternativas que estão na região de conflito, pois as que estão fora provavelmente receberão avaliações piores das que estão dentro dessa região. Sendo, dessa forma, dominadas.

Figura 30 – Região de Conflito dos critérios Custo e MTBOF.



Fonte: A Autora (2019).

É preciso levar em consideração, também, que valores muito pequenos de intervalos entre inspeções podem ser inviáveis na prática, representando a recomendação de uma frequência de inspeções impraticáveis sendo estes descartados do conjunto de soluções possíveis.

5.2.4 Realizar a avaliação de preferência do decisor

Esta etapa consiste na construção da função valor para cada um dos critérios, as quais devem representar o domínio do espaço de consequências que representa cada um dos critérios e que, posteriormente, serão utilizadas para construir a função valor global, através da avaliação das constantes de escala. Existem diversos procedimentos na literatura para realizar essa avaliação, para então construir uma função que represente o critério. Dentre eles, podem-se citar o método de *trade-off*, SMARTS e SMARTER, AHP, entre outros (DE ALMEIDA, 2013).

Outrossim, esse procedimento é bastante importante na tomada de decisão, pois inclui a avaliação subjetiva do tomador de decisão quanto ao comportamento dos critérios avaliados. E, após desenvolver essas equações, é importante verificar se tais funções realmente representam a preferência do decisor. Caso não represente, é necessário iniciar o processo de construção novamente, para adaptar ou reestabelecer as funções.

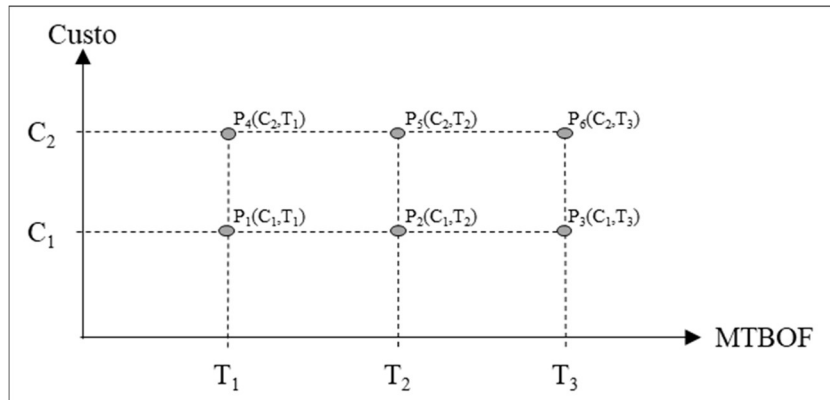
De uma maneira geral, para construir a função valor unidimensional, considera-se uma transformação de escala, em que os valores para o critério estarão entre 0 (representa o pior desempenho) e 1 (representa o melhor desempenho). Essa transformação representa o ganho ou a perda no critério, de acordo com o ponto inicial considerado.

5.2.5 Desenvolver a agregação multiatributo

Essa etapa é necessária para desenvolver a função valor global que deverá ser maximizada para encontrar a melhor estratégia de manutenção frente aos dados obtidos e às preferências expressas pelo decisor. Pode-se iniciar verificando a possibilidade de utilização de uma função de agregação aditiva, a qual pode ser utilizada se houver independência aditiva entre os critérios Custo e MTBOF.

Essa checagem pode ser verificada em detalhes em Kenney e Raiffa (1976). Resumidamente ela consiste em analisar a Figura 31, em que as seguintes loterias (substituindo as incógnitas por valores) são apresentadas ao decisor: $[P_4, p; P_3, (1-p)]$ e $[P_6, p; P_1, (1-p)]$, em que P_4 representa a melhor consequência para ambos os critérios, enquanto que P_3 representa a pior consequência e P_6 e P_1 representam uma combinação entre melhor e pior consequência. Se o decisor for indiferente entre essas loterias, mesmo substituindo os valores de C_1 e T_3 por qualquer outro valor, pode-se dizer que há independência aditiva, e a função valor multicritério pode tomar a forma de uma função de agregação aditiva, conforme Equação 5.3.

Figura 31 – Avaliação das condições de independência.



Fonte: A Autora (2019).

$$v(C, MTBOF) = k_1 v(C(\Delta, M, K)) + k_2 v(MTBOF(\Delta, M, K)) \quad (102)$$

k_1 e k_2 representam as constantes de escala para cada os critérios Custo e MTBOF, respectivamente, em que $k_1 + k_2 = 1$. A busca pelos valores das constantes de escala é realizada através de procedimentos abordados por Keeney e Raiffa (1976), os quais avaliam o *trade-off* entre os critérios.

Assim, a política de manutenção a ser adotada pelo tomador de decisão deve ser aquela que maximiza a Equação 5.3, e que melhor representa os critérios adotados e as preferências do decisor consideradas.

5.2.6 Fazer análise de sensibilidade

Tratando-se de um modelo de Pesquisa Operacional, realizar análise de sensibilidade do modelo é uma importante etapa no processo decisório, uma vez que pode fornecer informações sobre o comportamento de variáveis e parâmetros que possam auxiliar nas estratégias a serem adotadas (ANDRADE, 2015). Em modelos de apoio à decisão multicritério, costuma-se realizar variações nas constantes de escala para verificar o comportamento do modelo.

5.2.7 Preparar a recomendação

Os modelos de apoio à decisão fornecem *insights* para a tomada de decisão mais acertada de acordo com os parâmetros fornecidos e variáveis que foram modeladas. Dessa forma, a partir dos resultados apresentados pelo modelo de apoio à decisão, faz-se uma recomendação de qual melhor curso de ação tomar para se ter os melhores resultados. Assim, com o modelo de decisão multicritério apresentado será possível recomendar ao decisor o intervalo entre inspeções, o número mínimo de inspeções para considerar a chegada de oportunidade, assim como o número de inspeções em um ciclo, como resultado da maximização da função valor global do modelo.

5.3 Aplicação numérica do modelo multicritério

Como já explanado anteriormente, o problema aqui se trata da definição de uma política de manutenção que leve aos melhores resultados possíveis, considerando os dados do problema envolvido e as preferências do tomador de decisão. Para tanto, será utilizado o modelo de manutenção original que foi desenvolvido no Capítulo 4 desse trabalho.

O decisor do problema é o responsável por determinar os intervalos entre inspeções que devem ser realizados no componente, assim como responsável por avaliar a qualidade dessa manutenção, dar treinamento aos operadores da manutenção e fazer todo o gerenciamento desse setor. Ele será chamado aqui de gestor de manutenção. No entanto, não existe um decisor real para essa aplicação, porém foram utilizados valores realísticos no que se relaciona a aspectos preferenciais.

A aplicação numérica levará em consideração 5 alternativas, as quais se diferenciam pela equipe que executa as ações de manutenção e consequentemente pelos custos associados, conforme descrição a seguir:

A1, A2 e A3: todas as ações são realizadas pela equipe local, no entanto, considera-se que, em A2, seja realizado um treinamento para a equipe, reduzindo a probabilidade de ocorrência de erros na inspeção, há certo aumento no custo de inspeção. E, em A3, considera-se que a qualidade da manutenção é melhorada, tendo um aumento no custo de substituição preventiva, o que reflete nos demais custos.

A4 e A5: Todas as ações são realizadas por uma equipe especializada (OEM), regidas por diferentes contratos de manutenção.

Como foi possível observar na aplicação do modelo de minimização de custo, a opção de utilização de contratos com uma equipe especializada apresenta uma maior confiabilidade para o sistema, enquanto a utilização da equipe local proporciona menores custos de manutenção. No entanto, tal modelo não foi capaz de fornecer um modelo de seleção da melhor opção para o gestor de manutenção. Assim, a utilização de um modelo multicritério passa a ser de fundamental contribuição, principalmente avaliando qual dos dois critérios possui maior impacto para o sistema. Portanto, essa situação fundamenta ainda mais o desenvolvimento do presente capítulo, bem como da avaliação da aplicação numérica, com essas cinco alternativas.

A Tabela 10 apresenta os valores para os parâmetros para serem utilizados na avaliação das 5 alternativas.

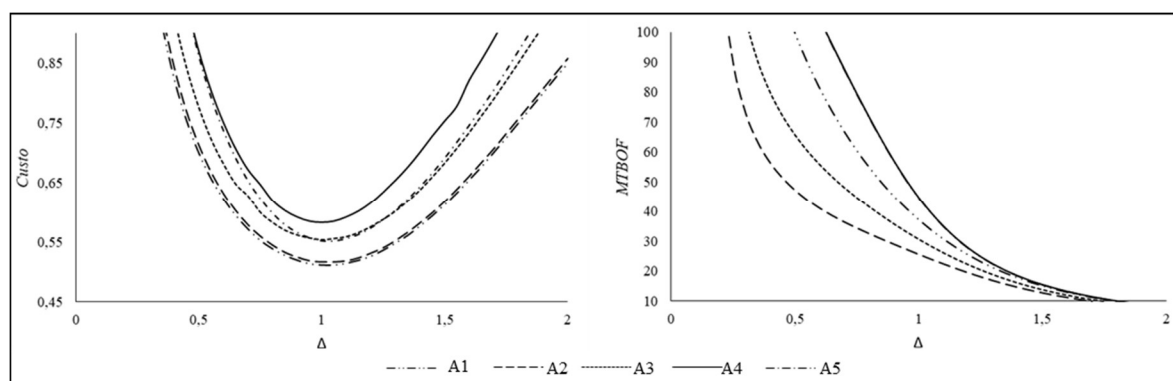
Tabela 10 – Valores utilizados para a aplicação numérica para o modelo multicritério.

Parâmetro	Descrição	Valores				
		A1	A2	A3	A4	A5
β	Probabilidade de ocorrência de falso negativo	0,2	0,15	0,2	0	0
α	Probabilidade de ocorrência de falso positivo	0,1	0,07	0,1	0	0
b_w	Parâmetro de forma da chegada do defeito (componente fraco)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
η_w	Parâmetro de escala da chegada do defeito (componente fraco)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
b_s	Parâmetro de forma da chegada do defeito (componente forte)	5	5	5	5	5
η_s	Parâmetro de escala da chegada do defeito (componente forte)	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
λ_z	Taxa de chegada de oportunidade	2	2	2	2	2
μ_H	Parâmetro para o cálculo da chegada de falha	1	1	1	1	1
p	Parâmetro de mistura da amostra	0,12	0,12	0,08	0,05	0,06
C_p	Custo de substituição preventiva	1,00	1,00	1,20	1,00	1,00
C_f	Custo de substituição do componente na falha	5,00	5,00	6,00	7,50	6,50
C_o	Custo de substituição em uma oportunidade	0,50	0,50	0,60	0,80	0,70
C_i	Custo de inspeção	0,03	0,06	0,03	0,09	0,12

Fonte: A Autora (2019).

Em relação aos dois critérios, pode ser apresentado ao decisor os gráficos da **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** que representam o comportamento para as funções Custo e MTBOF (B) para as 5 alternativas, com o intuito de que ele entenda esse comportamento e que possa auxiliá-lo na definição do espaço de consequências para o problema.

Figura 32 – Comportamento das funções custo e MTBOF para as alternativas da aplicação do modelo multicritério.



Fonte: A Autora (2019).

A próxima etapa do desenvolvimento do modelo de multicritério trata do estabelecimento do Espaço de Consequências (ES), em que um domínio para as variáveis de decisão precisa ser definido. Dessa forma, uma combinação de valores para M , K e Δ , em que M foi variado de 1 até 5, K de 2 até 10, e Δ é o melhor valor do intervalo de tempo considerando as demais variáveis, foi avaliada.

Para o MTBOF, não é possível estabelecer um valor mínimo para Δ por sua característica de monotonicamente decrescente, porém o decisor pode estabelecer esse valor. Foi assumido que o valor mínimo possível para o intervalo entre inspeções é de 0,3. Dessa forma, para definir o Espaço de Consequências tem-se que $v(C)=1$ e $v(MTBOF)=0$ para o mínimo custo que a avaliação pode assumir, e $v(C)=0$ e $v(MTBOF)=1$ para o valor máximo do intervalo médio entre falhas operacionais que a avaliação pode assumir.

Assim, foi possível estipular funções valores para cada um dos critérios, considerando que para o MTBOF essa função é linear (o ganho marginal relacionado ao critério é constante), enquanto para o Custo exponencial, desenvolvidas a partir dos limites máximo e mínimo para as alternativas. Esses limites são definidos a partir da delimitação do espaço de consequências para o problema. Como não se trata de um decisor real, a construção das funções que

representam os critérios está relacionada a escolha de parâmetros que melhor representam o espaço de consequências, não necessitando realizar análise de regressão.

A Equação 5.4 apresenta a função valor para o critério custo e a Equação 5.5 mostra a função valor para o critério MTBOF, em que para ambas $0,3 \leq \Delta \leq 1,022$.

$$v(C) = 10,618e^{(-4,61C(\Delta, M, K))} \quad (103)$$

$$v(MTBOF) = 0,0033(MTBOF(\Delta, M, K)) - 0,0818 \quad (104)$$

Considerando que haja independência aditiva entre os critérios, pode-se então utilizar a função de agregação aditiva, conforme Equação 5.3, para encontrar o valor global que melhor representa os resultados. Para tanto é preciso definir os valores para as constantes de escala, que representam o *trade-off* que ocorre entre os critérios, em que diversos métodos já foram utilizados para calcular.

Nesse momento, considerando que se trata de uma aplicação numérica, diferentes valores para as constantes de escala k_1 e k_2 serão avaliados, no sentido de recomendar uma melhor ação de manutenção a ser tomada, conforme apresenta Tabela 11, que é também uma análise de sensibilidade para o modelo.

Tabela 11 – Resultado da aplicação do modelo multicritério.

k_1	k_2	A1				A2				A3				A4				A5			
		Δ	M	K	v	Δ	M	K	v	Δ	M	K	v	Δ	M	K	v	Δ	M	K	v
0,6	0,4	1,008	2	4	0,607	1,01	2	4	0,596	0,984	2	4	0,505	0,952	2	3	0,466	0,993	2	3	0,499
0,55	0,45	1,004	2	4	0,557	1,006	2	4	0,548	0,979	2	4	0,466	0,941	2	3	0,435	0,985	2	3	0,464
0,5	0,5	1	2	4	0,507	1,002	2	4	0,498	0,972	2	4	0,426	0,3	1	2	0,505	0,974	2	3	0,428
0,45	0,55	0,996	2	4	0,457	0,997	2	4	0,449	0,964	2	3	0,387	0,3	1	2	0,555	0,3	1	2	0,456
0,4	0,6	0,99	2	4	0,407	0,991	2	4	0,4	0,954	2	4	0,347	0,3	1	2	0,606	0,3	1	2	0,498

Fonte: A Autora (2019).

A principal contribuição da utilização de um modelo multicritério para avaliar as alternativas apresentadas é poder contar com um aporte para a decisão do gestor de manutenção, de maneira que suas preferências em relação aos critérios possam ser consideradas. A Tabela 11 apresenta que, a depender dos valores das constantes de escala, a escolha da melhor alternativa pode ser modificada. Enquanto $k_1 \geq k_2$, observa-se que a melhor alternativa para o problema é a utilização de uma equipe local para executar as ações, ao passo que, quando $k_2 > k_1$, a melhor alternativa é a utilização da OEM. Ou seja, à medida em que a confiabilidade do

sistema passa a receber maior atenção, a opção de maior custo e de maior confiabilidade passa a ser a melhor escolha.

Assim, quando $k_1 \geq k_2$ a recomendação é a escolha da Alternativa 1. Observa-se que os valores ótimos para M e K continuam os mesmos do que quando utilizado o modelo de minimização de taxa de custo, no entanto o valor de Δ torna-se menor. Já quando $k_2 > k_1$, a recomendação é a escolha da Alternativa 4, em que valores diferentes para todas as variáveis de decisão são encontrados para esse caso quando comparado ao modelo de minimização da taxa de custo de manutenção.

Embora as Alternativas 2, 3 e 5 não aparecerem como melhores alternativas para o problema em nenhuma das variações das constantes de escala, observa-se que elas não são alternativas dominadas. A Alternativa 2, por exemplo, a taxa de custo de manutenção é superior à Alternativa 1, no entanto o MTBOF é maior. E isso ocorre na comparação de todas as alternativas, portanto, todas elas são mantidas na análise.

Como foi visto no Capítulo 4, o decisor poderia escolher entre as opções que trariam uma melhora na qualidade das ações executadas, enquanto se pagava mais caro por isso, ou então escolher pagar menos e ter uma qualidade menor. Entretanto, essa era uma decisão intuitiva do gestor. Nesse momento, um modelo pode servir de apoio para essa tomada de decisão, sendo essa a maior contribuição da utilização desse modelo.

Ademais, os resultados evidenciam que se deve ter cuidado ao elicitar as constantes de escala, pois essas interferem diretamente nos resultados do modelo. Dessa maneira, a elicitação da constante de escala deve seguir um protocolo já amplamente divulgado pelos autores da área, para obtenção das constantes de escala, de maneira a expressar as preferências do decisor. Observa-se uma modificação significativa nas recomendações a partir da modificação dos valores das constantes de escala.

Uma análise de sensibilidade pode apontar problemas com os valores elicitados. Uma vez desenvolvidas as equações das funções valor para os critérios, realizada a avaliação das constantes de escala e escolher a melhor possibilidade, pode-se analisar diferentes performances dos resultados de acordo com variações para as constantes de escala para efetuar a análise de sensibilidade. Percebe-se que, à medida em que o valor de k_1 é reduzido (entre 0,6 e 0,5), observa-se uma redução nos valores de Δ não tão impactantes, enquanto os valores de M e K permanecem inalterados. Isso pode evidenciar que a eficiência da recomendação é pouco afetada por inconsistências no processo.

5.4 Síntese Conclusiva do Capítulo

O Capítulo 5 apresentou o desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão multicritério, levando em consideração o modelo original apresentado no Capítulo 4, com o objetivo de verificar de que forma a visão de um tomador de decisão interfere no problema, e avaliando sua interação com diferentes aspectos relevantes para a tomada de decisão, demonstrando como as relações entre os critérios e a estrutura de preferência do decisor podem afetar a decisão final. De maneira que o problema continua sendo encontrar o tempo de intervalo entre inspeções Δ , a quantidade de inspeções para considerar a chegada de oportunidade, M , e a quantidade máxima de inspeções em um ciclo, K .

Para tanto, primeiramente foi apresentada uma motivação para o desenvolvimento desse capítulo, embasada em alguns autores da área. Posteriormente, foram apresentados os passos para o desenvolvimento de um problema de apoio à decisão que utiliza MAVT, mostrando a sequência de passos a serem desenvolvidos para a sua aplicação. Em seguida, uma aplicação desse modelo foi proposta, avaliando dois possíveis casos, um em que a manutenção é executada pela equipe local e outro por uma equipe especializada.

No modelo de decisão apresentado, utilizou-se para a avaliação o critério Custo e o critério MTBOF, que é uma medida de confiabilidade para o sistema, em que funções valores para cada um deles foi desenvolvida tendo como base o espaço de consequências para as alternativas. Além disso, a função de agregação aditiva foi utilizada.

Observou-se que, à medida em que a constante de escala relacionada ao critério MTBOF aumenta, menores são os intervalos entre inspeções e menor é a quantidade de inspeções realizadas em um ciclo. Isso se dá pelo fato de que, em intervalos menores de inspeção, o tempo médio entre falhas é menor, o que aumenta a confiabilidade do sistema. Além disso, essa diminuição na constante de escala também proporciona um distanciamento dos valores encontrados para as variáveis de decisão com o modelo de minimização do custo e do modelo de multicritério.

Também ficou evidenciada a importância da elicitação correta das constantes de escala, uma vez que elas possuem impacto direto nas recomendações que serão feitas pelo modelo.

Dessa maneira, é possível afirmar que, em processos que possuem um decisor mais experiente e que tenha conhecimento das características do sistema, é importante levar em consideração a sua percepção quanto ao sistema, para trazer resultados mais reais e de aplicação prática mais assertiva proporcionado pela utilização de um modelo de apoio à decisão. O que é

preciso verificar, também, é a disponibilidade do decisor em utilizar esse tipo de modelo, que demanda tempo dele para responder aos questionamentos e interagir com o analista.

6 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

A partir de um referencial teórico fundamentado em autores renomados da área de manutenção e de uma fundamentação teórica dos principais trabalhos na área de manutenção preventiva oportuna, percebeu-se uma lacuna de modelos que considerassem a utilização de oportunidades de manutenção juntamente com a avaliação de possibilidade de erros na execução de inspeção, chamados de falso positivo e falso negativo. Dessa forma, o presente trabalho veio com o intuito de sanar essa lacuna, desenvolvendo um modelo de manutenção que minimize o custo de manutenção por unidade de tempo, levando principalmente em conta dois aspectos: oportunidade e erros na inspeção.

Neste sentido, considera-se que o trabalho atendeu ao seu primeiro objetivo de desenvolvimento desse modelo. Foi necessário considerar algumas suposições acerca do sistema para poder desenvolver o modelo. Dentre elas, destacam-se algumas: sistema monocomponente, inspecionado periodicamente em um limite de tempo finito, sem dependência estrutural e estocástica dos outros componentes do sistema, degradação crescente modelada por três estados (bom, defeituoso e falho), e em que uma substituição o componente é renovado para um estado de tão bom quanto novo.

Observou-se, principalmente, que a ocorrência de erros na inspeção promove um aumento significativo na taxa de custo de manutenção esperada e uma diminuição do intervalo médio entre falhas operacionais, estando eles ligados ao número de inspeções realizadas em um ciclo e ao tempo entre inspeções. Quanto maiores forem as probabilidades de ocorrer erros nas inspeções, os intervalos entre as inspeções tendem a serem maiores, porém a quantidade de inspeções diminui. Isso foi creditado justamente ao fato de que, em uma inspeção, um componente pode ser substituído sem ter necessidade (falso positivo) ou, estando o componente em estado defeituoso, ele não ser identificado na inspeção e não ser substituído (falso negativo).

Além disso, observou-se que gestores de manutenção, quando puderem considerar janelas de manutenção proporcionadas por paradas do sistema pelos demais componentes do sistema é vantajoso em termos de custo de manutenção por unidade de tempo. Ou seja, políticas de manutenção baseadas em oportunidades podem fornecer uma economia de cifras monetárias para o sistema de manutenção. Foi o que mostrou a análise dos resultados propostos pelo modelo.

Uma limitação para o modelo desenvolvido foi a não aplicação em um caso real de manutenção. Para os testes do modelo, foram considerados dados provenientes de outros trabalhos, com o intuito de verificar a consistência do modelo desenvolvido, mas não foi possível verificar sua aplicabilidade em um caso real até o momento. Mas tem-se a crença que, diante das facilidades computacionais existentes em dias atuais, e a facilidade de disseminação de conhecimento e informação, não haveria dificuldades em se aplicar o modelo em um caso real.

O modelo de apoio à decisão atuou como uma forma de identificar se a visão das preferências de um tomador de decisão, quando inclusas no processo de tomada de decisão, podem influenciar nos resultados obtidos. Foi observado que a resposta para esse questionamento é positiva, principalmente pelo fato de que o modelo de mínimo custo do Capítulo 4 utiliza o MTBOF como uma medida de confiabilidade do sistema, mas não inclui no processo de otimização dos resultados. Já o modelo de decisão multicritério inclui esse elemento com um critério para a tomada de decisão, e o considera um fator importante para manter a qualidade do componente.

Diferentes resultados podem ser encontrados com o modelo de decisão multicritério, a depender das características do decisor, principalmente em relação à aversão, propensão e neutralidade em relação ao risco na tomada de decisão. Além disso, a importância de um critério e a compensação entre eles pode ser avaliada e inclusa no modelo, o que também provoca alterações nos resultados. O modelo de apoio à decisão multicritério construiu uma função de utilidade multidimensional que deve ser maximizada, de forma que, ao mesmo tempo, seja minimizado o custo de manutenção e maximizado tempo médio entre falhas operacionais, alinhando-se esses objetivos às preferências do decisor.

Por fim, pode-se dizer que o presente trabalho tem como fundamental contribuição a construção de modelos que permitem encontrar intervalos de tempo para inspeções para componente sujeito a oportunidades de manutenção e a erros na inspeção. Fato esse que ainda não é muito explorado na literatura da área, conforme visto no Capítulo 3. Assim, um modelo analítico que considera minimizar o custo de manutenção por unidade de tempo e um modelo de apoio à decisão que analisa dois critérios ao mesmo tempo incluindo a visão do decisor caracterizam as contribuições fundamentais desta tese.

6.1 Trabalhos Futuros

A partir do trabalho desenvolvido podem ser citados alguns pontos de melhoria, aperfeiçoamento e/ou continuação, partindo-se de aspectos não abordados nesta tese. Dentre eles:

- Realizar a aplicação em um caso real do modelo, verificando possíveis alterações nas características dos dados;
- Para o modelo analítico de minimização do custo, considerar inspeções não periódicas, verificando a possibilidade de necessidade de inspeções em intervalos de tempos distintos;
- Considerar a existência de algum tipo de dependência entre os componentes do sistema;
- Considerar a possibilidade de postergação de substituição do componente;
- Ainda para o modelo analítico verificar se há necessidade de continuar inspecionando o componente após a quantidade mínima de inspeções para considerar a chegada de oportunidade;
- Para o modelo de apoio à decisão multicritério, verificar a necessidade de avaliar algum outro critério juntamente com os dois já analisados, como por exemplo o *downtime*, que em algumas empresas apresenta um fator importante na tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

- AB-SAMAT, H.; KAMARUDDIN, S. Opportunistic maintenance (OM) as a new advancement in maintenance approaches. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 20, n. 2, p. 98-121, 2014.
- ABDOLLAHZADEH, H.; ATASHGAR, K.; ABBASI, M. Multi-objective opportunistic maintenance optimization of a wind farm considering limited number of maintenance groups. *Renewable Energy*, v. 88, p. 247–261, 2016.
- ALBERTI, A. R.; CAVALCANTE, C. A. V.; SILVA, A. L. O. E.; SCARF, P. A. Modelling inspection and replacement quality for a protection system. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 176, pp. 145-153, 2018.
- ALDURGAM, M. M.; DUFFUAA, S. O. Optimal joint maintenance and operation policies to maximize overall systems effectiveness. *International Journal of Production Research*, v. 51, n. 5, p. 1319-1330, 2013.
- ALMEIDA, A. T. *Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério*. São Paulo: Atlas, 2013.
- ALMEIDA, A. T.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALENCAR, M. H.; FERREIRA, R. J. P.; ALMEIDA FILHO, A. T.; GARCEZ, T. V. *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*. Nova York: Springer, 2015.
- 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*, v. 26, n. 3, p. 249-271, 2015.
- ALMEIDA, A. T.; GEIGER, M. J.; MORAIS, D. C. Challenges in multicriteria decision methods. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 29, n. 3, p. 247-252, 2018;
- ANDRADE, E. L. *Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para a tomada de decisões*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- AVEN, T. Optimal test interval for a monotone safety system. *Journal of Applied Probability*, v. 46, n. 2, p. 330-341, 2009.
- AVEN, T.; CASTRO, I. T. A delay-time model with safety constraint. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 94, n. 2, p. 261-267, 2009.
- BADIA, F. G.; BERRADE, M. D. Optimum Maintenance of a System under two Types of Failure. *International Journal of Materials & Structural Reliability*, v. 4, n.1, p.27-37, 2006.
- BAKER, R. D.; WANG, W. Estimating the delay-time distribution of faults in repairable machinery from failure data. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 3, n. 4, p. 259-281, 1991.

- BAKER, R. D.; WANG, W. Developing and Testing the Delay-Time Model. *Journal of the Operational Research Society*, v. 44, n. 4, p. 361-374, 1993.
- BANA E COSTA, C. A.; CARNERO, M. C.; OLIVEIRA, M. D. A multi-criteria model for auditing a Predictive Maintenance Programme. *European Journal of Operational Research*, v. 217, p. 381-393, 2012.
- BASTIDAS-ARTEAGA, E.; SCHOEFS, F. Stochastic improvement of inspection and maintenance of corroding reinforced concrete structures placed in unsaturated environments. *Engineering Structures*, v. 41, p. 50-62, 2012.
- BEDFORD, T.; DEWAN, I.; MEILIJON, I.; ZITROU, A. The signal model: a model for competing risks of opportunistic maintenance. *European Journal of Operational Research*, v. 214, n. 3, p. 665-673, 2011.
- BELTON, V.; STEWART, T. J. *Multiple Criteria Decision Analysis: an integrated approach*. Londres: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- BEN-DAYA, M.; KUMAR, U.; MURTHY, D. N. P. *Introduction to maintenance engineering: modeling, optimization, and management*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- BERRADE, M. D. A two-phase inspection policy with imperfect testing. *Applied Mathematical Modelling*, v. 36, n. 1, p. 108-114, 2012.
- BERRADE, M. D.; CAVALCANTE, C. A. V.; SCARF, P. A. Maintenance scheduling of a protection system subject to imperfect inspection and replacement. *European Journal of Operational Research*, v. 218, p. 716-725, 2012.
- BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A. V.; DWIGHT, R. A. Imperfect inspection and replacement of a system with a defective state: A cost and reliability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 120, p. 80-87, 2013.
- BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A. V. Some Insights Into the Effect of Maintenance Quality for a Protection System. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 64, n. 2, p. 661-672, 2015.
- BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A. V. A study of postponed replacement in a delay time model. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 168, p. 70-79, 2017.
- BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 70, n. 1, p. 71-83, 2000.
- BOUYSSOU, D. Decision Multicritère ou Aide Multicritère. *Bulletin du Groupe de Travail européen; Aide multicritère à la decision*, Series 2, n. 2, p. 1-2, 1993.
- BOUYSSOU, D.; MARCHANT, T.; PIRLOT, M.; PERNY, P.; TSOUKIAS, A.; VINCKE, P. *Evaluation and decision models: a critical perspective*. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2000.

BUKOWSKI, J. V. Modeling and analyzing the effects of periodic inspection on the performance of safety-critical systems. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 50, n. 3, p. 321-329, 2001.

CAI, J.; ZHU, L. A delay-time model with imperfect inspection for aircraft structure subject to a finite time horizon. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREY SYSTEMS AND INTELLIGENT SERVICES, 2011. *Proceedings [...]*. Nanjing, China: IEEE, 2011.

CARNERO, M. C. An evaluation system of the setting up of predictive maintenance programmes. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 91, p. 945-963, 2006.

CARR, M. J.; CHRISTER, A. H. Incorporating the potential for human error in maintenance models. *Journal of the Operational Research Society*, v. 54, n. 12, p. 1249-1253, 2003.

CASTANIER, B.; GRALL, A.; BÉRENGUER, C. A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 87 n. 1, p. 109-120, 2005.

CAVALCANTE, C. A. V.; ALENCAR, M. H.; LOPES, R. S. Multicriteria Model to Support Maintenance Planning in Residential Complexes under Warranty. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 143, n. 4, p. 04016110-1- 04016110-9, 2017.

CAVALCANTE, C. A. V.; COSTA, A. P. C. S. Multicriteria Model of Preventive Maintenance. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, v. 3, n. 1, p.71-86, 2006.

CAVALCANTE, C. A. V.; LOPES, R. S. Opportunistic maintenance policy for a system with hidden failures: a multicriteria approach applied to an emergency diesel generator. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2014, p. 1-11, 2014.

CAVALCANTE, C. A. V.; LOPES, R. S. Multi-criteria model to support the definition of opportunistic maintenance policy: A study in a cogeneration system. *Energy*, v. 80, p. 32-40, 2015.

CAVALCANTE, C. A. V.; LOPES, R. S.; SCARF, P. A. A general inspection and opportunistic replacement policy for one-component systems of variable quality. *European Journal of Operational Research*, v. 266, p. 911-919, 2018.

CHELBI, A.; AIT-KADI, D.; ALOUI, H. Optimal inspection and preventive maintenance policy for systems with self-announcing and non-self-announcing failures. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 14, n. 1, p. 34-45, 2008.

CHENG, Z.; YANG, Z.; GUO, B. Optimal opportunistic maintenance model of multi-unit systems. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, v. 24, n. 5, p. 811-817, 2013.

CHO, D. I.; PARLAR, M. A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research*, v. 51, p. 1-23, 1991.

CHRISTER, A. H. Modelling Inspection Policies for Building Maintenance. *Journal of the Operational Research*, v. 33, n. 8, p. 723-732, 1982.

CHRISTER, A. H. Developments in delay time analysis for modelling. *Journal of the Operational Research Society*, v. 50, n. 11, p. 1120-1137, 1999.

CHRISTER, A. H.; LEE, C. Refining the delay-time-based PM inspection model with non-negligible system downtime estimates of the expected number of failures. *International Journal of Production Economics*, v. 67, n. 1, p. 77-85, 2000.

CHRISTER, A. H.; REDMOND, D. F. Revising models of maintenance and inspection. *International Journal of Production Economics*, v. 24, n. 3, p. 227-234, 1992.

CHRISTER, A. H.; WALLER, W. M. Delay Time Models of Industrial Inspection Maintenance Problems. *The Journal of the Operational Research Society*, v. 35, n. 5, p. 401-406, 1984.

CHRISTER, A. H.; WANG, W.; CHOI, K.; SHARP, J. The delay-time modelling of preventive maintenance of plant given limited PM data and selective repair at PM. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 9, n. 4, p. 355-379, 1998.

COLLEDANI, M.; MAGNANINI, M. C.; TOLIO, T. Impact of opportunistic maintenance on manufacturing system performance. *CIRP Annals*, v. 67, n. 1, p. 499-502, 2018.

CUI, L.; LI, H. Opportunistic maintenance for multi-component shock models. *Mathematical Methods of Operations Research*, v. 63, p. 493-511, 2006.

DAGG, R. A.; NEWBY, M. Optimal overhaul intervals with imperfect inspection and repair. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 9, p. 381-391, 1998.

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

DAS, A. N.; SARMAH, S. P. Preventive replacement models: an overview and their application in process industries. *European Journal and Industrial Engineering*, v. 4, n. 3, p. 280-307, 2010.

DEKKER, R. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 51, n. 3, p. 229-240, 1996.

DEKKER, R.; SCARF, P. A. On the impact of optimisation models in maintenance decision making: the state of the art. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 60, n. 2, p. 111-119, 1998.

DEKKER, R.; SMEITINK, E. Opportunity-based block replacement. *European Journal of Operational Research*, v. 53, n. 1, p. 46-63, 1991.

DEKKER, R.; VAN RIJN, C. PROMPT, A Decision Support System for Opportunity-Based Preventive Maintenance. In: OZEKICI, S., ed. *Reliability and Maintenance of Complex Systems*. Bebek-istanbul: Springer, p. 530-549, 1995.

DEKKER, R.; WILDEMAN, R. E.; SCHOUTEN, F. A. D. A Review of Multi-Component Maintenance Models with Economic Dependence. *Mathematical Methods of Operations Research*, v. 45, p. 411-435, 1997.

- DEVOOGHT, J.; DUBUS, A.; SMIDTS, C. Suboptimal inspection policies for imperfectly observed realistic systems. *European Journal of Operational Research*, v. 45, n. 2-3, p. 203-218, 1990.
- DHILLON, B. S.; LIU, Y. Human error in maintenance: a review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 12, n. 1, p. 21-36, 2006.
- DING, F.; TIAN, Z. Opportunistic maintenance for wind farms considering multi-level imperfect maintenance thresholds. *Renewable Energy*, v. 45, p. 175-182, 2012.
- DRIESSEN, J. P. C.; PENG, H.; VAN HOUTUM, G. J. Maintenance optimization under non-constant probabilities of imperfect inspections. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 165, p. 115-123, 2017.
- EPSTEIN, S.; WILAMOWSKY, Y. Opportunistic replacement in a deterministic environment. *Computers and Operations Research*, v. 12, n. 3, p. 311-322, 1985.
- FADDOUL, R.; RAPHAEL, W.; SOUBRA, A.-H.; CHATEAUNEUF, A. Partially observable markov decision processes incorporating epistemic uncertainties. *European Journal of Operational Research*, v. 241, n. 2, p. 391-401, 2015.
- FERREIRA, R. J. P.; 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 and System Safety*, v. 94, n. 5, p. 905-912, 2009.
- FLAGE, R. A delay time model with imperfect and failure-inducing inspections. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 124, p. 1-12, 2014.
- GARG, A.; DESHMUKH, S. G. Maintenance management: literature review and directions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 12, n. 3, p. 205-238, 2006.
- GENG, J.; AZARIAN, M.; PECHT, M. Opportunistic maintenance for multi-component systems considering structural dependence and economic dependence. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, v. 26, n. 3, p. 493-501, 2015.
- GOLMAKANI, H. R.; MOAKEDI, H. Periodic inspection optimization model for a multi-component repairable system with failure interaction. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 61, p. 295-302, 2012.
- GUNN, E. A.; DIALLO, C. Optimal opportunistic indirect grouping of preventive replacements in multicomponent systems. *Computers and Industrial Engineering*, v. 90, p. 281-291, 2015.
- HASHEMIAN, H. M.; BEAN, W. C. State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques. *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, v. 60, n. 10, p. 3480-3492, 2011.
- HE, K.; MAILLART, L. M.; PROKOPYEV, O. A. Scheduling Preventive Maintenance as a Function of an Imperfect Inspection Interval. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 64, n. 3, p. 983-997, 2015.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introduction to operations research*. 10. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2015.

HSU, J.-T.; HSU, L.-F. Two EPQ models with imperfect production processes, inspection errors, planned backorders, and sales returns. *Computers and Industrial Engineering*, v. 64, n. 1, p. 389-402, 2013.

HU, J.; ZHANG, L. Risk based opportunistic maintenance model for complex mechanical systems. *Expert Systems with Applications*, v. 41, p. 3105-3115, 2014.

JHANG, J. P.; SHEU, S. H. Opportunity-based age replacement policy with minimal repair, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 64, n. 3, p. 339-344, 1999.

JONES, B.; JENKINSON, I.; WANG, J. Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 91, n. 1, p. 111-124, 2009.

JUNCA, M.; SANCHEZ-SILVA, M. Optimal maintenance policy for permanently monitored infrastructure subjected to extreme events. *Probabilistic Engineering Mechanics*, v. 33, p. 1-8, 2013.

KAIO, N.; OSAKI, S. Optimal inspection policy with two types of imperfect inspection probabilities. *Microelectronics Reliability*, v. 26, n. 5, p. 935-942, 1986.

KALLEN, M. J.; VAN NOORTWIJK, J. M. Optimal maintenance decisions under imperfect inspection. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 90, n. 2-3, p. 177-185, 2005.

KANG, K.; SUBRAMANIAM, V. Joint control of dynamic maintenance and production in a failure-prone manufacturing system subjected to deterioration. *Computers and Industrial Engineering*, v. 119, n. 1. p. 309-320, 2018.

KECECIOGLU, D.; SUN, F. A general discrete-time dynamic programming model for the opportunistic replacement policy and its application to ball-bearing systems. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 47, p. 175-185, 1995.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. *Decision with multiple objectives: preferences and value trade-offs*. Nova York: Wiley, 1976.

KHAN, F. I.; HADDARA, M. M.; BHATTACHARYA, S. K. Risk-Based Integrity and Inspection Modeling (RBIIM) of Process Components/System. *Risk Analysis*, v. 26, n. 1, p. 203-221, 2006.

KOOCHAKI, J.; BOKHORST, J. A.; WORTMANN, H.; KLINGENBERG, W. Condition based maintenance in the context of opportunistic maintenance. *International Journal of Production Research*, v. 50, n. 23, p. 6918-6929, 2012.

KULKARNI, S. S.; ACHENBACH, J. D. Structural Health Monitoring and Damage Prognosis in Fatigue. *Structural health monitoring: An International Journal*, v. 7, n. 1, p. 37-49, 2008.

KUMAR, G.; JAIN, V.; GANDHI, O. P. Steady-state availability analysis of repairable mechanical systems with opportunistic maintenance by using Semi-Markov process. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, v. 5, n 4, p. 664-678, 2014.

L'ECUYER, P.; HAURIE, A. Preventive replacement for multicomponent systems: an opportunistic discrete-time dynamic programming model. *IEEE Transactions on Reliability*, v. R-32, n. 1, p. 117-118, 1983.

LAGGOUNE, R.; CHATEAUNEUF, A.; AISSANI, D. Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units, *Computers and Chemical Engineering*, v. 33, n. 9, p. 1499-1510, 2009.

LE, M. D.; TAN, C. M. Optimal maintenance strategy of deteriorating system under imperfect maintenance and inspection using mixed inspection scheduling. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 113, p. 21-29, 2013.

LEE, J.; WANG, H. New Technologies for Maintenance. In: KOBACZY, K. A. H.; MURTHY, D. (ed.). *Complex System Maintenance Handbook*. Londres: Springer, 2008. p. 49-78

LEE, H.; CHA, J. H. New stochastic models for preventive maintenance and maintenance optimization. *European Journal of Operational Research*, v. 255, n. 1, p. 80-90, 2016.

LEVRAT, E.; THOMAS, E.; IUNG, B. Odds-based decision-making tool for opportunistic production-maintenance synchronization. *International Journal of Production Research*, v. 46, n. 19, p. 5263-5287, 2008.

LIANG, T. Y. Optimum piggyback preventive maintenance policies. *IEEE Transactions on Reliability*, v. R-34, n. 5, p. 529-538, 1985.

LIN, B.; WU, J.; LIN, R.; WANG, J.; WANG, H.; ZHANG, X. Optimization of high-level preventive maintenance scheduling for high-speed trains. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 183, p. 261-275, 2019.

LIN, Y.-H.; CHEN, J.-M.; CHEN, Y.-C. The impact of inspection errors, imperfect maintenance and minimal repairs on an imperfect production system. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 53, n. 9-10, p. 1680-1691, 2011.

MAHMOUDI, M.; ELWANY, A.; SHAHANAGHI, K.; GHOLAMIAN, M. R. A Delay Time Model With Multiple Defect Types and Multiple Inspection Methods. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 66, n. 4, p. 1073-1084, 2017.

MAKIS, V. Optimal Lot Sizing and Inspection Policy for an EMQ Model with Imperfect Inspections. *Naval Research Logistics*, v. 45, p. 165-186, 2008.

MARSARO, M. F.; CAVALCANTE, C. A. V. Random preventive maintenance policy based on inspection for a multicomponent system using simulation. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, v. 19, n. 4, p. 552-559, 2017.

MOHAMED-SALAH, O.; DAOUD, A. K.; ALI, G. A simulation model for opportunistic maintenance strategies. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION*, 7., Barcelona, 1999. *Proceedings* [...]. Barcelona, ESP: ETFA, 1999. v. 1, p. 703-708.

MOHAMMADI, B.; TALEIZADEH, A. A.; NOOROSSANA, R.; SAMIMI, H. Optimizing integrated manufacturing and products inspection policy for deteriorating manufacturing system with imperfect inspection. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 37, p. 299-315, 2015.

MOURA, M. C.; LINS, I. D.; DROGUETT, E. L.; SOARES, R. F.; PASCUAL, R. A Multi-Objective Genetic Algorithm for determining efficient Risk-Based Inspection programs. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 133, p. 253-265, 2015.

NOWAKOWSKI, T.; WERBIŃKA, S. On problems of multicomponent system maintenance modelling. *International Journal of Automation and Computing*, v. 6, n. 4, p. 364-378, 2009.

OKOGBAA, O. G.; OTIENO, W.; PENG, X.; JAIN, S. Transient analysis of maintenance intervention of continuous multi-unit systems. *IIE Transactions*, v. 40, n. 10, p. 971-983, 2008.

OKUMURA, S.; JARDINE, A. K. S.; YAMASHINA, H. An inspection policy for a deteriorating single-unit system characterized by a delay-time model. *International Journal of Production Research*, v. 34, n. 9, p. 2441-2460, 1996.

ORCESI, A. D.; FRANGOPOL, D. M. Use of Lifetime Functions in the Optimization of Nondestructive Inspection Strategies for Bridges. *Journal of Structural Engineering*, v. 137, n. 4, p. 531-539, 2011.

PELLEGRIN, C. A graphical procedure for an on-condition maintenance policy: imperfect-inspection model and interpretation. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 3, n. 3, p. 177-191, 1991.

PENG, R.; LIU, B.; ZHAI, Q.; WANG, W. Optimal maintenance strategy for systems with two failure modes. *Reliability Engineering and System Safety*, In press article, 2017.

PHAM, H.; WANG, H. Imperfect Maintenance. *European Journal of Operational Research*, v. 94, p. 425-438, 1996.

PHAM, H.; WANG, H. Optimal (t,T) opportunistic maintenance of a k-out-of-n: G system with imperfect PM and partial failure. *Naval Research Logistics*, v. 47, n. 1, p. 223-239, 2000.

PIETRUCZUK, A. J.; WERBIŃSKA-WOJCIECHOWSKA, S. Block Inspection Policy Model with Imperfect Maintenance for Single-unit Systems. *Procedia Engineering*, v. 187, p. 570-581, 2017.

PINTELON, L.; PARODI-HERZ, A. Maintenance: An Evolutionary Perspective. *In: KOBBACY, K. A. H, MURTHY, D. N. P. (eds.). Complex System Maintenance Handbook*. Londres: Springer, 2008. pp. 21-48.

POPPE, J.; BOUTE, R. N.; LAMBRECHT, M. R. A hybrid condition-based maintenance policy for continuously monitored components with two degradation thresholds. *European Journal of Operational Research*, v. 268, n. 2, p. 515–532, 2018.

PULLEN, K. W.; THOMAS, M. U. Evaluation of an Opportunistic Replacement Policy for a 2-Unit System. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 35, n. 2, p. 320-324, 1986.

RADNER, R.; JORGENSEN, D. W. Optimal replacement and inspection of stochastically failing equipment. In: ARROW, K. J.; KARLIN, S.; SCARF, H. (eds.). *Studies in Applied Probability and Management Science*. Stanford: Stanford University Press, p. 184-206, 1962.

RADNER, R.; JORGENSEN, D. W. Opportunistic replacement of a single part in the presence of several monitored parts. *Management Science*, v. 10, p. 70-84, 1963.

RAO, A. N.; BHADURY, B. Opportunistic maintenance of multi-equipment system: a case study. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 16, p. 487-500, 2000.

RAZA, A.; ULANSKY, V. Optimal Thresholds for Stochastically Deteriorating Systems. In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE, São Francisco, 2015. *Proceedings [...]*. São Francisco: WCECS, 2015. v. 2.

ROY, B. Paradigms and Challenges. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. eds. *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. Boston: Springer, 2005. p. 3-24.

SAHRAOUI, Y.; CHATEAUNEUF, A.; KHELIF, R. Inspection and maintenance planning of underground pipelines under the combined effect of active corrosion and residual stress. *International Journal of Steel Structures*, v. 17, n. 1, p. 165-174, 2017.

SAHRAOUI, Y.; KHELIF, R.; CHATEAUNEUF, A. Maintenance planning under imperfect inspections of corroded pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 104, p. 76-82, 2013.

SARANGA, H. Opportunistic maintenance using genetic algorithms. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 10, p. 66-74, 2004.

SARKAR, B.; SAREN, S. Product inspection policy for an imperfect production system with inspection errors and warranty cost. *European Journal of Operational Research*, v. 248, n. 1, p. 263-271, 2016.

SARKER, B. R.; FAIZ, T. I. Minimizing maintenance cost for offshore wind turbines following multi-level opportunistic preventive strategy. *Renewable Energy*, v. 85, p. 104-113, 2016.

SATOW, T.; OSAKI, S. Opportunity-based age replacement with different intensity rates, *Mathematical and Computer Modelling*, v. 38, n. 11-13, p. 419-426, 2003.

SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A.; KNEZEVIC, J. Optimal opportunistic maintenance policy using genetic algorithms, 1: formulation. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 1, n. 2, p. 34-49, 1995.

- SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A. V. Modelling quality in replacement and inspection maintenance. *International Journal of Production Economics*, v. 135, n. 1, p. 372-381, 2012.
- 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*, v. 58, n. 4, p. 641-648, 2009.
- SCARF, P. A.; WANG, W.; LAYCOCK, P. J. A stochastic model of crack growth under periodic inspections. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 51, n. 3, p. 331-339, 1996.
- SETT, B. K.; SARKAR, S.; SARKAR, B. Optimal buffer inventory and inspection errors in an imperfect production system with preventive maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 90, n. 1-4, p. 545-560, 2017.
- SEYEDHOSSEINI, S. M.; MOAKEDI, H.; SHAHANAGHI, K. Imperfect inspection optimization for a two-component system subject to hidden and two-stage revealed failures over a finite time horizon. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 174, p. 141-156, 2018.
- SHAFIEE, M.; FINKELSTEIN, M.; BÉRENGUER, C. An opportunistic condition-based maintenance policy for offshore wind turbine blades subjected to degradation and environmental shocks. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 1, n. 142, p. 463-471, 2015.
- SHARMA, A.; YADAVA, G. S.; DESHMUKH, S. G. A literature review and future perspectives on maintenance optimization. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 11, n.1, p. 5-25, 2011.
- SHEN, J.; CUI, L. Optimal scheduling of imperfect and perfect inspections for systems subject to continuous degradation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT, Singapura, 2017. *Proceedings [...]*. Singapura: IEEM, 2017.
- SHI, H.; ZENG, J. Real-time prediction of remaining useful life and preventive opportunistic maintenance strategy for multi-component systems considering stochastic dependence. *Computers and Industrial Engineering*, v. 93, p. 192-204, 2016.
- SONG, S.; LI, Q.; FELDER, F. A.; WANG, H.; COIT, D. W. Integrated optimization of offshore wind farm layout design and turbine opportunistic condition-based maintenance. *Computers and Industrial Engineering*, v. 120, p. 288-297, 2018.
- SRIVASTAVA, M. S.; WU, Y. Estimation and testing in an imperfect-inspection model. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 42, n. 2, p. 280-286, 1993.
- TAGARAS, G. An Integrated Cost Model for the Joint Optimization of Process Control and Maintenance. *The Journal of the Operational Research Society*, v. 39, n. 8, p. 757-766, 1988.
- TAGHIPOUR, S.; BANJEVIC, D. Optimal inspection of a complex system subject to periodic and opportunistic inspections and preventive replacements. *European Journal of Operational Research*, v. 220, p. 649-660, 2012.

- TAMBE, P. P.; MOHITE, S.; KULKARNI, M. S. Optimisation of opportunistic maintenance of a multi-component system considering the effect of failures on quality and production schedule: A case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 69, n. 5-8, p. 1743-1756, 2013.
- TAN, J. S.; KRAMER, M. A. A general framework for preventive maintenance optimization in chemical process operations. *Computers and Chemical Engineering*, v. 21, n. 12, p. 1451-1469, 1997.
- THOMAS, L. C. A survey of maintenance and replacement Models for Maintainability and Reliability of Multi-Item systems. *Reliability Engineering*, v. 16, p. 297-309, 1986.
- THOMAS, E., LEVRAT, E.; IUNG, B. Overview on opportunistic maintenance. In: WORKSHOP ON INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEMS, 9., 2008, Szczecin, POL. *Proceedings* [...]. Szczecin, POL: IFAC, Oct. 2008.
- TRUONG BA, H.; CHOLETTE, M. E.; BORGHESANI, P.; ZHOU, Y.; MA, L. Opportunistic maintenance considering non-homogenous opportunity arrivals and stochastic opportunity durations. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 160, p. 151-161, 2017.
- VAN DER WEIDE, J. A. M.; PANDEY, M. D.; VAN NOORTWIJK, J. M. Discounted cost model for condition based maintenance optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 95, p. 236-246, 2010.
- Van HORENBEEK, A.; PINTELON, L.; MUCHIRI, P. Maintenance optimization models and criteria. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, v.1, n. 3, p. 189-200, 2010.
- VERGIN, R. C.; SCRIABIN, M. Maintenance scheduling for multicomponent equipment, *AIIE Transaction*, v. 9, n. 3, p. 297-305, 1977.
- VINCKE P. *Multicriteria decision-aid*. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- VOLOVOI, V.; VALENZUELA, R. C On compact modeling of coupling effects in maintenance processes of complex systems. *International Journal of Engineering Science*, v. 59, p. 193-210, 2012.
- VU, H. C.; DO, P.; BARROS, A.; BERENGUER, C. Maintenance planning and dynamic grouping for multi-component systems with positive and negative economic dependencies. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 26, n. 2, 145-170, 2014.
- WANG, C.-H.; HWANG, S.-L. A stochastic maintenance management model with recovery factor. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 10, n. 2, p. 154-165, 2004.
- WANG, C.-H.; SHEU, S. H. Determining the optimal production–maintenance policy with inspection errors: using a Markov chain. *Computers and Operations Research*, v. 30, n. 1, p. 1-17, 2003.
- WANG, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, v. 139, p. 469-489, 2002.

- WANG, H.; PHAM, H. *Reliability and Optimal Maintenance*. Londres: Springer, 2006.
- WANG, H.; YAJIMA, A.; LIANG, R. Y.; CASTANEDA, H. Reliability-based temporal and spatial maintenance strategy for integrity management of corroded underground pipelines. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 12, n. 10, p. 1281-1294, 2015.
- WANG, L.; CHU, J.; MAO, W. A condition-based order-replacement policy for a single-unit system. *Applied Mathematical Modelling*, v. 32, n. 11, p. 2274-2289, 2008.
- WANG, L.; HU, H.; WANG, Y.; WU, W.; HE, P. The availability model and parameters estimation method for the delay time model with imperfect maintenance at inspection. *Applied Mathematical Modelling*, v. 35, p. 2855-2863, 2011.
- WANG, W.; CHRISTER, A. H. Solution algorithms for a nonhomogeneous multi-component inspection model. *Computers and Operations Research*, v. 30, p. 19-34, 2003.
- WANG, W. Delay Time Modelling. In: KOBACZY, K. A. H.; MURTHY, D. (eds.). *Complex System Maintenance Handbook*. Londres: Springer, 2008. p. 345-372.
- WANG, W. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 106, p. 165-178, 2012.
- WELTE, T. M.; VATN, J.; HEGGSET, J. Markov State Model for Optimization of Maintenance and Renewal of Hydro Power Components. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROBABILISTIC METHODS APPLIED TO POWER SYSTEMS, 2006, Stockholm, SWE. *Proceedings* [...]. Stockholm, SWE: IEEE, 2006.
- WILLIAMS, G. B.; HIRANI, R. S. A delay time multi-level on-condition preventive maintenance inspection model based on constant base interval risk—when inspection detects pending failure. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 37, n. 6, p. 823-836, 1997.
- WU, S.; CLEMENTS-CROOME, C. Optimal Maintenance Policies Under Different Operational Schedules. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 54, n. 2, p. 338-346, 2005.
- XIA, T.; XI, L.; PAN, E.; NI, J. Reconfiguration-oriented opportunistic maintenance policy for reconfigurable manufacturing systems. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 166, p. 87-98, 2017.
- YANG, L.; MA, X.; ZHAO, Y. Random and periodic inspection of mission-based systems with a defective stage. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2016, Tucson USA. *Proceedings* [...]. Tucson, USA: RAMS, 2016.
- YANG, L.; ZHAO, Y.; PENG, R.; MA, X. Opportunistic maintenance of production systems subject to random wait time and multiple control limits. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 47, p. 12-34, 2018.
- YE, Z.; CHEN, N.; TSUI, K.-L. A Bayesian Approach to Condition Monitoring with Imperfect Inspections. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 31, n. 3, p. 513-522, 2015.

YILDIRIM, M.; GEBRAEEL, N. Z.; SUN, X. A. Integrated Predictive Analytics and Optimization for Opportunistic Maintenance and Operations in Wind Farms. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 32, n. 6, p. 4319-4328, 2017.

YUN, W. Y.; BAI, D. S. Repair cost limit replacement policy under imperfect inspection. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 23, n. 1, p. 59-64, 1988.

ZEQUEIRA, R. I.; BÉRENGUER, C. Optimal scheduling of non-perfect inspections. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 17, n. 2, p. 187-207, 2006.

ZEQUEIRA, R. I.; VALDES, J. E.; BERENGUER, C. Optimal buffer inventory and opportunistic preventive maintenance under random production capacity availability, *International Journal of Production Economics*, v. 111, n. 2, pp. 686-696, 2008.

ZHANG, X.; ZENG, J. Deterioration state space partitioning method for opportunistic maintenance modelling of identical multi-unit systems. *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 7, p. 2100-2118, 2014.

ZHANG, X.; ZENG, J. A general modelling method for opportunistic maintenance modeling of multi-unit systems. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 140, p. 176-190, 2015.

ZHANG, X.; ZENG, J. Joint optimization of condition-based opportunistic maintenance and spare parts provisioning policy in multiunit systems. *European Journal of Operational Research*, v. 262, n. 2, p. 479-498, 2017.

ZHANG, C.; GAO, W.; GUO, S.; LI, Y.; YANG, T. Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, reliability-based maintenance. *Renewable Energy*, v. 103, p. 606-612, 2017.

ZHAO, J.; CHAN, A. H. C.; ROBERTS, C.; MADELIN, K. B. Reliability evaluation and optimisation of imperfect inspections for a component with multi-defects. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 92, p. 65-73, 2007.

ZHAO, J.; CHAN, A. H. C.; BURROW, M. P. N. Probabilistic Model for Predicting Rail Breaks and Controlling Risk of Derailment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1995, p. 76-83, 2007.

ZHAO, J.; MIAO, S.; ZHANG, S. An integrated model for optimizing maintenance and inspection of potential failures. *8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*, 2009.

ZHAO, L.; CHEN, M.; ZHOU, D. General (N, T, τ) Opportunistic Maintenance for Multicomponent Systems With Evident and Hidden Failures. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 65, n. 3, p. 1298-1313, 2016.

ZHAO, H.; XU, F.; LIANG, B.; ZHANG, J.; SONG, P. A condition-based opportunistic maintenance strategy for multi-component system. *Structural Health Monitoring: An International Journal*, p. 1-13, 2018.

ZHENG, X. All opportunity-triggered replacement policy for multiple-unit systems. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 44, n. 4, p. 648-652, 1995.

ZHENG, X.; FARD, N. Hazard-Rate Tolerance Method for an Opportunistic-Replacement Policy. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 41, n. 1, p. 13-20, 1992.

ZHOU, B.; YU, J.; SHAO, J.; TRENTESAUX, D. Bottleneck-based opportunistic maintenance model for series production systems. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 21, n. 1, p. 70-88, 2015.

ZHOU, X.; XI, F.; LEE, J. Opportunistic preventive maintenance scheduling for a multi-unit series system based on dynamic programming. *International Journal of Production Economics*, v. 118, p. 361-366, 2009.

ZHOU, Y.; ZHANG, X.; LIN, Z. A Comparison of Different Shipment Policies in an Integrated Inventory System for Imperfect Quality Items with Inspection Errors. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2017, p. 1-17, 2017.

ZOPOUNIDIS, C. Multicriteria decision aid in financial management. *European Journal of Operational Research*, v. 119, n. 2, p. 404-415, 1999.