



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

THIAGO LIMA DE BARROS

**PROPOSIÇÃO DE POLÍTICAS DE INSPEÇÃO E
MANUTENÇÃO PARA SISTEMAS DE PROTEÇÃO
SUJEITOS A FALHA OCULTA E DEGRADAÇÃO**

Caruaru

2019

THIAGO LIMA DE BARROS

**PROPOSIÇÃO DE POLÍTICAS DE INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO
PARA SISTEMAS DE PROTEÇÃO SUJEITOS A FALHA OCULTA E
DEGRADAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Otimização e Gestão da Produção.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sampaio Lopes

Caruaru

2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

B277p Barros, Thiago Lima de.
Proposição de políticas de inspeção e manutenção para sistemas de proteção sujeitos a falha oculta e degradação. / Thiago Lima de Barros. – 2019.
124 f.; il.: 30 cm.

Orientador: Rodrigo Sampaio Lopes.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2019.
Inclui Referências.

1. Manutenção (Brasil). 2. Dispositivos protetores (Brasil). 3. Processo decisório por critério múltiplo. 4. Medidas preventivas (Brasil). 5. Planejamento estratégico (Brasil). I. Lopes, Rodrigo Sampaio (Orientador). II. Título.

CDD 658.5 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-037)

THIAGO LIMA DE BARROS

**PROPOSIÇÃO DE POLÍTICAS DE INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO
PARA SISTEMAS DE PROTEÇÃO SUJEITOS A FALHA OCULTA E
DEGRADAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 27/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. RODRIGO SAMPAIO LOPES (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste (UFPE/CAA)

Prof. Dr. THALLES VITELLI GARCEZ (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste (UFPE/CAA)

Prof. Dr. ANDRÉ MORAIS GURGEL (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

AGRADECIMENTOS

Sou imensamente grato, em primeiro lugar, a Deus por ter me mantido firme durante essa trajetória, a minha namorada, Joyce, e a minha família que sempre me apoiaram em todas as minhas decisões, especialmente meus pais, Cícera e Severino, por dedicarem cada segundo de suas vidas a realizar os sonhos de seus filhos.

Agradeço também aos amigos do mestrado com quem convivi diariamente por quase 2 anos e pude compartilhar tantos momentos bons, em especial Klívia e Taisy que estiveram comigo desde o início e se mostraram grandes companheiras, e aos integrantes do Random/Caruaru pela união e cumplicidade que construímos juntos, apoiando sempre uns aos outros como uma verdadeira família.

Por fim, agradeço ao Professor Rodrigo pelas orientações e apoio, e a FACEPE pelo auxílio financeiro que foi essencial para a concretização desta pesquisa.

RESUMO

Sistemas de proteção são caracterizados por entrar em funcionamento apenas quando são demandados. Por não funcionarem continuamente, os sistemas de proteção estão sujeitos a falha oculta, que só pode ser detectada através de inspeções ou demanda. Apesar de sua importância, as ações de inspeção desgastam o sistema, contribuindo para sua degradação. Isso gera a necessidade de realizar ações de manutenção para controlar a degradação sofrida. Neste sentido, gestores de manutenção enfrentam dificuldades em definir as políticas de inspeção e manutenção para sistemas de proteção. Dois modelos de decisão são propostos neste trabalho. A primeira contribuição é um modelo de indisponibilidade proposto para definir as políticas de inspeção e manutenção do sistema em uma abordagem onde as ações de manutenção ocorrem sob melhoria contínua. A segunda contribuição trata-se de um modelo multicritério proposto com o objetivo de avaliar as consequências da política de inspeção para os critérios: custo, saúde e segurança, meio ambiente e recuperação operacional. Uma aplicação numérica foi realizada para cada modelo e os resultados mostraram que, no Modelo 1, ao adotar práticas de melhoria contínua sobre as manutenções a indisponibilidade do sistema é reduzida em maior proporção ao longo do tempo, enquanto os resultados do Modelo 2 indicaram uma política de inspeção que atende satisfatoriamente os requisitos do problema, diante dos critérios propostos.

Palavras-chave: Falha oculta. Sistema de proteção. Política de inspeção. Política de manutenção. Melhoria contínua. Decisão multicritério.

ABSTRACT

Protection systems are characterized by coming into operation only when they are demanded. As protection systems do not operate continuously, they are subject to a hidden failure, which can only be detected through inspections or demand. Although inspection actions are important, they contribute to the degradation of the system. This generates the need to perform maintenance actions to control the degradation suffered. In this sense, maintenance managers face difficulties in defining the inspection and maintenance policies for protection systems. Two models of decision are proposed in this work. The first contribution is a proposed unavailability model to define system inspection and maintenance policies in an approach where maintenance actions occur under continuous improvement. The second contribution is a multicriteria model proposed to evaluate the consequences the consequences of the inspection policy for the criteria: cost, health and safety, environment and operational recovery. A numerical application was performed for each model and the results showed that in Model 1, when adopting practices of continuous improvement over maintenance the system unavailability is reduced in greater proportion over time, while the results of Model 2 indicated an inspection policy that satisfactorily meets the requirements of the problem, according to the proposed criteria.

Keywords: Hidden failure. Protection system. Inspection policy. Maintenance policy. Continuous improvement. Multicriteria decision.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Metodologia utilizada na pesquisa.....	17
Figura 2 –	Consequências de uma falha oculta entre ações de inspeção.....	21
Figura 3 –	Pilares técnicos do WCM.....	29
Figura 4 –	Número de citações dos artigos associados a políticas de inspeção para sistemas sujeitos a falha oculta.....	37
Figura 5 –	Número de citações dos artigos associados a políticas de manutenção imperfeita para sistemas sujeitos a degradação.....	38
Figura 6 –	Número de artigos por consideração de restrição e tipo de eficácia de inspeção assumida.....	44
Figura 7 –	Frequência de inspeção adotada nos artigos revisados.....	44
Figura 8 –	Grau de restauração assumido após detecção da falha.....	45
Figura 9 –	Variáveis de decisão assumidas.....	45
Figura 10 –	Critérios de decisão considerados.....	46
Figura 11 –	Variáveis de decisão assumidas.....	54
Figura 12 –	Critérios de decisão considerados.....	55
Figura 13 –	Número de artigos por consideração de restrição e tipo de sistema....	55
Figura 14 –	Efeitos considerados pelos artigos sob a degradação do sistema.....	56
Figura 15 –	Número de artigos por fator de melhoria considerado na ação de manutenção imperfeita.....	56
Figura 16 –	Número de pesquisadores pelo mundo com trabalhos envolvendo sistemas com falha oculta.....	57
Figura 17 –	Modelo 1.....	61
Figura 18 –	Modelo 2.....	72
Figura 19 –	Utilização dos modelos propostos de acordo com o nível de planejamento organizacional.....	78
Figura 20 –	Indisponibilidade total média para os modelos PAR e PAS considerando a eficácia da manutenção sob a Lei do Poder.....	81
Figura 21 –	Indisponibilidade total média para os modelos PAR e PAS considerando a eficácia da manutenção sob a Lei Exponencial.....	82
Figura 22 –	Contribuições para indisponibilidade total média do componente sob o Modelo PAR.....	84

Figura 23 –	Contribuições para indisponibilidade total média do componente sob o Modelo PAS.....	85
Figura 24 –	PFD do componente para $T=1460$ e diferentes intervalos de manutenção e eficácias de manutenção.....	87
Figura 25 –	PFD do componente para $T=2190$ e diferentes intervalos de manutenção e eficácias de manutenção.....	88
Figura 26 –	PFD do componente para $T=2920$ e diferentes intervalos de manutenção e eficácias de manutenção.....	89
Figura 27 –	PFD do componente após a primeira e última manutenção sob o Modelo PAR para diferentes M , T e eficácia de manutenção.....	91
Figura 28 –	PFD do componente após a primeira e última manutenção sob o Modelo PAS para diferentes M , T e eficácia de manutenção.....	92
Figura 29 –	PFD do componente imediatamente após ação de manutenção para diferentes Eficácias.....	94
Figura 30 –	Indisponibilidade total média de um período de renovação para diferentes eficácias iniciais e números de manutenção em L	96
Figura 31 –	Indisponibilidade total média de um período de renovação para diferentes eficácias iniciais e números de manutenções em L , sob Efeito de Segurança.....	98
Figura 32 –	Percentual de variações submetidas aos parâmetros do Modelo 1 para análise de sensibilidade.....	100
Figura 33 –	Resultado da análise de sensibilidade considerando a eficácia de manutenção sob a Lei do Poder para $m=3$ e $T=4380$	103
Figura 34 –	Resultado da análise de sensibilidade considerando a eficácia de manutenção sob a Lei Exponencial para $m=3$ e $T=4380$	104
Figura 35 –	Custo Total em um ciclo de restauração para diferentes valores de K e T	108
Figura 36 –	Criticidade de Saúde e Segurança em um ciclo de restauração para diferentes valores de K e T	109
Figura 37 –	Criticidade de Recuperação Operacional em um ciclo de restauração para diferentes valores de K e T	109
Figura 38 –	Criticidade de Meio Ambiente em um ciclo de restauração para diferentes valores de K e T	109

Figura 39 –	Aceitabilidade de rank das alternativas mais bem posicionadas no <i>rank</i>	111
Figura 40 –	Diferentes combinações submetidas a ordem de preferência dos critérios do Modelo 2 para análise de sensibilidade.....	112
Figura 41 –	Valores dos critérios considerando a alternativa com melhor desempenho em cada cenário.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Tipos de manutenção.....	24
Tabela 2 –	Descrição dos pilares técnicos do WCM.....	29
Tabela 3 –	Ferramentas para melhoria da manutenção.....	31
Tabela 4 –	Fator de impacto e classificação das publicações no último quadriênio (2013 - 2016) na Área de Engenharias III.....	36
Tabela 5 –	Resumo da literatura de políticas de inspeção em sistemas sujeitos a falha oculta.....	42
Tabela 6 –	Resumo da literatura de políticas de manutenção imperfeita em sistemas sujeitos a degradação.....	51
Tabela 7 –	Criticidade das consequências de um acidente para a Saúde e Segurança.....	75
Tabela 8 –	Criticidade das consequências de um acidente para o Meio Ambiente.....	76
Tabela 9 –	Criticidade das consequências de um acidente para a Recuperação Operacional.....	77
Tabela 10 –	Dados de entrada para aplicação do Modelo 1.....	80
Tabela 11 –	Pontos de menor e maior contribuição da Não confiabilidade para indisponibilidade média total do componente.....	86
Tabela 12 –	Eficácia inicial de manutenção mínima necessária para atender a restrição \bar{u}_{TOTAL}^{max}	97
Tabela 13 –	Valores das variações submetidas aos parâmetros do Modelo 1 para análise de sensibilidade.....	101
Tabela 14 –	Descrição do comportamento esperado pelo Modelo 1 após cada variação.....	101
Tabela 15 –	Dados de entrada para aplicação do Modelo 2.....	106
Tabela 16 –	Matriz de consequências dos critérios.....	107
Tabela 17 –	Resultados da aplicação do SMAA-2 considerando a ordem de preferência $SS > CT > RO > MA$	110
Tabela 18 –	Alternativas com melhor desempenho para cada cenário.....	113

LISTA DE SIGLAS

ABAO	<i>As Bad As Old</i>
AGAN	<i>As Good As New</i>
CA	Curva de Aprendizado
HPP	<i>Homogeneous Poisson Process</i>
MC	Melhoria Contínua
MCDA	<i>Multiple-Criteria Decision Analysis</i>
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
NHPP	<i>Non-Homogeneous Poisson Process</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
PFD	Probabilidade de Falha de Demanda
SMAA	<i>Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis</i>
TOF	Taxa de Ocorrência de Falha
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
TQM	<i>Total Quality Management</i>
WCM	<i>World Class Manufacturing</i>

SUMÁRIO

1	<i>INTRODUÇÃO</i>	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.2	Metodologia de pesquisa	17
1.3	Estrutura do trabalho	19
2	<i>REFERENCIAL TEÓRICO</i>	20
2.1	Sistemas de proteção	20
2.2	Falha oculta	21
2.3	Políticas de inspeção para sistemas sujeitos a falha oculta	22
2.4	Políticas de manutenção para sistemas sujeitos a falha oculta	23
2.4.1	Função de confiabilidade de sistemas reparáveis.....	25
2.4.2	Função de indisponibilidade de sistemas sujeitos a falha oculta.....	27
2.5	Efeito das ações de inspeção e manutenção sobre a degradação do sistema	27
2.6	World class manufacturing	28
2.7	Métodos de apoio a decisão multicritério	33
2.7.1	O método SMAA-2.....	33
3	<i>REVISÃO DA LITERATURA</i>	36
3.1	Políticas de inspeção para sistemas sujeitos a falha oculta	39
3.1.1	Visão geral dos modelos.....	44
3.2	Políticas de manutenção imperfeita para sistemas sujeitos a degradação	46
3.2.1	Visão geral dos modelos.....	54
3.3	Discussão da literature	57
4	<i>MODELOS DE DECISÃO</i>	59
4.1	Modelo 1: modelo de indisponibilidade para componentes de segurança	59
4.1.1	Indisponibilidade de componentes standby em um período de renovação L	63
4.1.1.1	<i>Efeito de não confiabilidade</i>	63
4.1.1.1.1	<u><i>Equações de Melhoria Continua para Eficácia das Ações de</i></u>	

	<i>Manutenção</i>	65
4.1.1.2	<i>Efeito downtime</i>	69
4.1.2	Indisponibilidade de componentes standby em um período de renovação L , sob Efeito de Segurança: Uma otimização contra risco.....	70
4.2	Modelo 2: modelo multicritério para sistemas de proteção	71
4.2.1	Critério Custo.....	73
4.2.2	Critério Saúde e Segurança.....	74
4.2.3	Critério Meio Ambiente.....	75
4.2.4	Critério Recuperação Operacional.....	76
4.3	Aplicação dos modelos propostos: em que situações é mais recomendada a utilização do modelo 1 e do modelo 2?	77
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.1	Aplicação numérica para o modelo 1	80
5.1.1	Análise 1: Indisponibilidade total média do componente em um período de renovação, \bar{u}_{TOTAL}	80
5.1.2	Análise 2: Contribuições individuais para Indisponibilidade total média do componente em um período de renovação.....	83
5.1.3	Análise 3: Comportamento da Não Confiabilidade ao longo do tempo.....	86
5.1.4	Análise 4: Comportamento da Não confiabilidade após ações de manutenção sob diferentes eficácias.....	93
5.1.5	Análise 5: Indisponibilidade total média em um período de renovação para diferentes eficácias iniciais e números de manutenções em L	95
5.1.6	Análise 6: Indisponibilidade total média em um período de renovação para diferentes eficácias iniciais e números de manutenções em L , sob Efeito de Segurança.....	97
5.1.7	Análise de sensibilidade para o Modelo 1.....	99
5.1.8	Implicações gerenciais do Modelo 1.....	105
5.2	Aplicação numérica para o modelo 2	106
5.2.1	Análise de sensibilidade para o Modelo 2.....	112
5.2.2	Implicações gerenciais do Modelo 2.....	114

6	<i>CONCLUSÕES.....</i>	115
	<i>REFERÊNCIAS.....</i>	117

1 INTRODUÇÃO

Ações de manutenção são indispensáveis para manter o bom funcionamento dos sistemas, além de prolongar seu ciclo de vida. Em sistemas de proteção, a manutenção desempenha um papel de grande importância, visto que a disponibilidade desses sistemas é fundamental para evitar acidentes de grande impacto (CAVALCANTE; LOPES, 2014). Um acidente de grande impacto pode ser compreendido como um evento indesejado que resulta em sérias perdas referentes à vida, saúde, meio ambiente e ativos materiais. Emissões de substâncias tóxicas, descargas elétricas e explosões são alguns exemplos de acidentes que podem gerar sérias perdas (OKOH; HAUGEN, 2014).

Sistemas de proteção, como alarmes, válvulas de desligamento de emergência e detectores de incêndio são caracterizados por entrarem em funcionamento apenas quando são demandados, com o objetivo de evitar a ocorrência de acidentes decorrente de falhas. Por não serem utilizados continuamente ou com muita frequência, os sistemas de proteção estão sujeitos a falha oculta (NOWLAN; HEAP, 1978). Uma falha oculta só pode ser detectada através de inspeções ou quando o sistema é demandado. Dessa forma, se o sistema de proteção estiver em estado de falha e for demandado, um acidente pode ocorrer e gerar perdas de grande impacto para uma ou mais áreas. No entanto, caso a falha oculta seja detectada durante uma inspeção, o sistema poderá ser reparado antes de sua demanda, evitando assim os efeitos de um acidente (AHMADI *et al.*, 2016).

Okoh e Haugen (2014) citam que a deficiência em planejamento, programação e diagnóstico de falhas representam a maior parcela das causas de acidentes. Dessa forma, quando lidamos com sistemas de proteção, políticas de inspeção eficazes devem ser definidas para identificar e corrigir as falhas ocultas antes do sistema ser demandado. Se não houver um plano de inspeção programado para detectar e corrigir uma falha oculta, grandes perdas podem ser geradas (TANG *et al.*, 2013). Em razão disso, várias normas da NFPA (*National Fire Protection Association*) são utilizadas em todo o mundo para sistemas de proteção, como as NFPA 20, 24, 70E, 75, 76, 497, 664, com objetivo de manter o sistema disponível e minimizar os riscos associados a falhas.

Apesar de sua importância, as ações de inspeção causam desgaste no sistema devido à realização de testes de funcionamento. Com isso, além de falhas ocultas, os sistemas de proteção estão sujeitos a degradação, que pode ser controlada por ações de manutenção (MARTORELL *et al.*, 2017a). Neste sentido, estabelecer tanto políticas de inspeção quanto

políticas de manutenção para estes sistemas torna-se crucial para reduzir o risco de acidentes (CAVALCANTE; LOPES, 2014; MARTORELL *et al.*, 2017a).

Diversos trabalhos são propostos na literatura para definir as políticas de inspeção e manutenção de sistemas sujeitos a falha oculta e degradação. No entanto, a maioria dos trabalhos que focam nas políticas de inspeção leva em consideração apenas um critério de decisão para estabelecer a política ótima, e como a falha de um sistema de proteção pode desencadear acidentes com potencial para gerar perdas simultâneas, como financeira, humana e ambiental, é fundamental assumir mais de um critério para definir a política de inspeção do sistema (DE ALMEIDA *et al.*, 2015). Por outro lado, boa parte dos trabalhos que propõem políticas de manutenção assumem que a eficácia das ações é constante e não melhora ao longo do tempo, o que não condiz com a realidade de muitas organizações da atualidade que buscam continuamente a melhoria de seus processos.

Dois modelos de decisão são apresentados nesta dissertação para auxiliar gestores de manutenção a definir as políticas de inspeção e manutenção de sistemas de proteção. A primeira proposta trata-se de um modelo de indisponibilidade que assume a eficácia das ações de manutenção sob melhoria contínua. E a segunda proposta refere-se a um modelo multicritério que avalia as consequências da decisão em quatro áreas distintas para definir a política de inspeção do sistema, além de considerar incertezas associadas as informações de preferência do decisor.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral propor políticas para auxiliar gestores de manutenção nas tomadas de decisão envolvendo as ações de inspeção e manutenção de sistemas sujeitos a falha oculta e degradação.

1.1.2 Objetivos Específicos

Visando alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

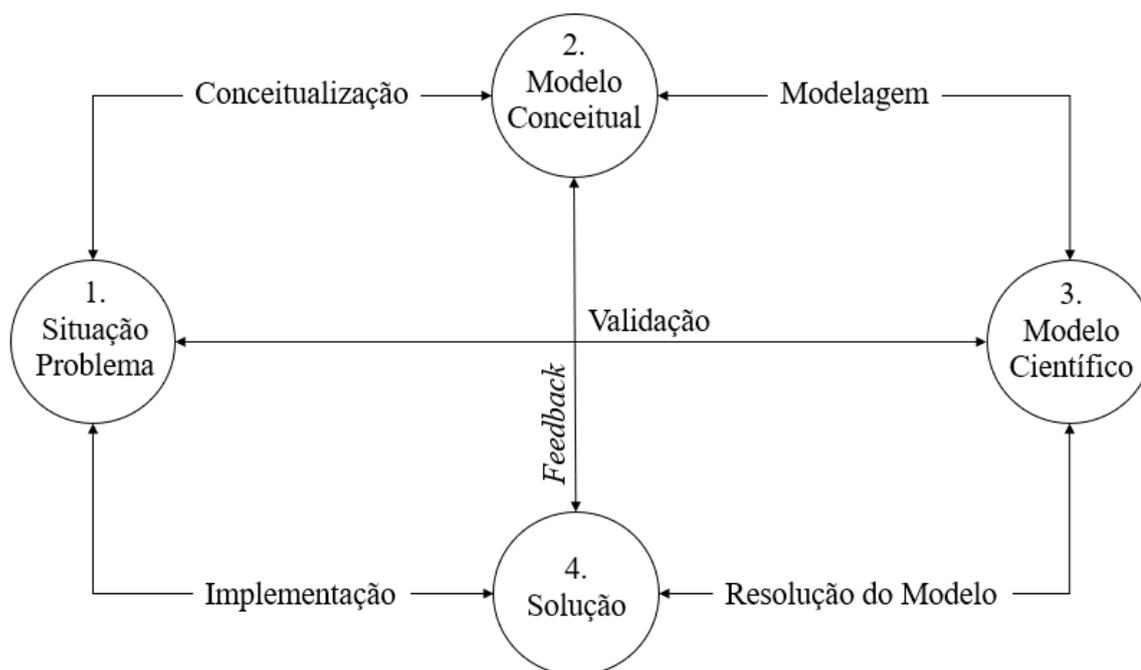
- Construir um modelo que auxilie a decisão considerando práticas de melhoria contínua sobre atividades de manutenção;
- Construir um modelo de decisão sobre uma abordagem multicritério envolvendo incertezas;

- Validar os modelos construídos por meio de aplicação numérica e análises de sensibilidade.

1.2 Metodologia de pesquisa

O método de pesquisa utilizado para o desenvolvimento desta dissertação foi baseado em um modelo proposto por Mitroff *et al.* (1974), que fornece um direcionamento bem estruturado para alcançar a resolução de um problema. A pesquisa foi dividida em quatro etapas descritas como Situação Problema, Modelo Conceitual, Modelo Científico e Solução, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Metodologia utilizada na pesquisa



Fonte: Adaptado de Mitroff *et al.* (1974)

I. Situação Problema

O processo de investigação se inicia pelo vago reconhecimento de que um problema existe (MITROFF, 1977). Esta percepção impulsiona a fase de conceitualização do problema, que tem como objetivo buscar conceitos e explicações sobre o problema investigado. Nesta fase, foram realizadas uma revisão da literatura (Capítulo 3) e uma base conceitual (Capítulo 2) para compreender o problema e formular o Modelo Conceitual.

II. Modelo Conceitual

Nesta etapa, é definido o Modelo Conceitual que estabelece, de forma mais abrangente, a definição fundamental do problema. Todo conhecimento e experiência obtidos pelo pesquisador é refletido através deste modelo (SAGASTI; MITROFF, 1973). É nesta etapa que se define o escopo do processo decisório, como variáveis e critérios de decisão, objetivos e caracterização dos decisores (DE ALMEIDA, 2013). Os modelos conceituais elaborados nesta pesquisa são apresentados no Capítulo 4 pelas Figuras Figura 17 e Figura 18.

III. Modelo Científico

Uma vez que um Modelo Conceitual tenha sido formulado, um Modelo Científico pode ser construído por meio das técnicas usuais de modelagem (MITROFF, 1977). O modelo científico corresponde a uma representação formal do modelo conceitual e é expresso através de símbolos matemáticos, linguagem computacional ou por meio de ambos (LANDRY; MALOUIN; ORAL, 1983). Os modelos científicos desenvolvidos nesta pesquisa são apresentados no Capítulo 4.

Após a formulação do modelo científico, é essencial verificar o seu grau de correspondência com a realidade (MITROFF, 1977). Essa correspondência entre o modelo científico e a realidade é chamada de validação (SAGASTI; MITROFF, 1973) que, por sua vez, pode ser realizada através de uma análise de sensibilidade que prove a robustez do modelo (DE ALMEIDA, 2013). As análises de sensibilidade dos modelos científicos desenvolvidos nesta pesquisa são apresentadas no Capítulo 5.

IV. Solução

Nesta etapa, são obtidos os resultados (ou *outputs*) advindos da resolução do modelo científico. Estes resultados representam a base para a tomada de decisão. É por meio deles que o pesquisador consegue fornecer o apoio necessário para melhorar os processos decisórios (SAGASTI; MITROFF, 1973). As sugestões realizadas nesta pesquisa são abordadas como implicações gerenciais no Capítulo 5.

A ligação entre a Solução e o Modelo Conceitual é rotulada como *Feedback* e representa o grau de correspondência entre a solução obtida pelo modelo científico com a conceitualização do problema (MITROFF, 1977). Esse *Feedback* possibilita que o pesquisador verifique a conformidade entre os conceitos que regem o problema com o que foi gerado como Solução (SAGASTI; MITROFF, 1973). Por fim, a ligação entre a Solução e a Situação Problema é referida como implementação da solução, que ocorre quando uma Solução é "devolvida" ao problema real com o intuito de solucioná-lo (MITROFF, 1977). Esta fase não foi desenvolvida nesta pesquisa.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto por 6 capítulos e está estruturado da seguinte forma:

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre a proposta do trabalho, assim como o objetivo geral, os objetivos específicos e a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos fundamentais para compreensão do presente trabalho.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão sistemática da literatura relacionada ao tema da pesquisa, referente a falha oculta de sistemas do tipo *standby*.

No Capítulo 4 são apresentados os modelos de decisão propostos neste trabalho.

O Capítulo 5 mostra uma aplicação numérica para cada um dos modelos propostos, apresenta os resultados gerados das respectivas aplicações e fornece uma análise de sensibilidade para ambos os modelos propostos.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho, ressaltando as principais colaborações realizadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentada a base conceitual necessária para compreensão do trabalho como um todo.

2.1 Sistemas de Proteção

Sistemas de proteção são compostos por um conjunto de componentes e são caracterizados por entrarem em funcionamento apenas quando são demandados, com o objetivo de evitar a ocorrência de eventos que possam causar consequências indesejadas (AHMADI *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2006).

Os sistemas de proteção são encontrados em dispositivos médicos, geradores de energia de *backup*, válvula de alívio de pressão, turbina de ar comprimido, detector de incêndio, extintor de incêndio, etc., e devem ser mantidos com alto nível de disponibilidade para evitar as diversas consequências indesejadas que possam surgir, decorrentes do tempo em que os sistemas de proteção permanecem inativos (AHMADI; KUMAR, 2011; BABISHIN; TAGHIPOUR, 2016a; TAGHIPOUR; BANJEVIC; JARDINE, 2008).

Em geral, sistemas ou componentes de segurança, que desempenham funções de proteção, só operam em casos de demanda real e possuem dois tipos principais de modos de falha: a) falhas devido à demanda e b) falha devido à prontidão do componente (modo *standby*). As falhas devido à demanda são decorrentes do desgaste sofrido pelo sistema todas às vezes em que ele é demandado, seja para exercer sua função de proteção (demanda real) ou para verificação de seu estado durante ações de inspeção. Já as falhas devido à prontidão (ou modo *standby*) são referentes a degradação natural que o sistema sofre pelo seu envelhecimento ao longo do tempo. Dessa forma, ambos os modos de falha contribuem para a degradação do sistema, o que faz com que sua probabilidade de falha na demanda aumente (MARTORELL *et al.*, 2017b).

Por não serem utilizados continuamente, além da degradação, esses sistemas também estão sujeitos a falha oculta, que se não detectada a tempo pode contribuir para a ocorrência de eventos com potencial para gerar grandes perdas (AHMADI *et al.*, 2016).

Tanto a degradação quanto a não confiabilidade (probabilidade de falha) e indisponibilidade destes sistemas/componentes podem ser reduzidas através de ações de inspeção/teste e manutenção, embora estas ações possam gerar efeitos positivos e negativos sobre seu estado (MARTORELL *et al.*, 2017b).

2.2 Falha oculta

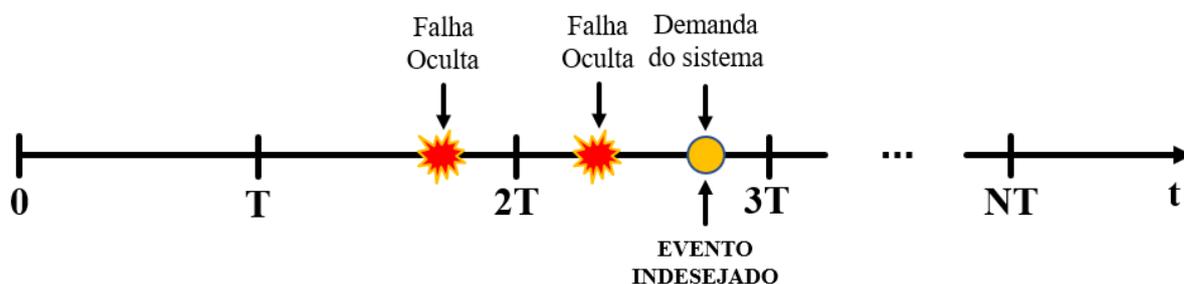
Uma falha é caracterizada como “oculta” quando sua ocorrência não é percebida imediatamente durante a realização das tarefas normais de uma instalação (LIU *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2015; YE; REVIE; WALLS, 2014; YEA; XIE, 2015).

De acordo com Ahmadi e Kumar (2011), as falhas ocultas são comuns em sistemas que desempenham funções de proteção ou segurança, como os citados na seção anterior, e só podem ser detectadas de duas maneiras:

- Por demanda real, quando o sistema de proteção é acionado devido a ocorrência de algum evento inesperado; ou
- Por inspeção: quando o sistema de proteção passa por testes periódicos para verificar seu estado de funcionamento.

Como a demanda real de equipamentos de emergência, componentes de segurança, sistemas de proteção e demais itens que desempenham funções ocultas ocorre aleatoriamente, é essencial que estes itens estejam disponíveis quando solicitados para evitar consequências indesejadas (AHMADI *et al.*, 2016; AHMADI; KUMAR, 2011). Como mostrado na Figura 2, se ocorrer uma falha oculta e o sistema não for demandado, na próxima inspeção (em $2T$) a falha será detectada e corrigida, no entanto, caso ocorra uma falha oculta e o sistema seja demandado antes da próxima inspeção (em $3T$), um evento indesejado pode surgir e causar sérias perdas.

Figura 2 – Consequências de uma falha oculta entre ações de inspeção



Fonte: Adaptado de Babishin e Taghipour (2016a)

Liu *et al.* (2017) afirma que apesar de a maioria das políticas de manutenção existentes na literatura terem sido propostas para sistemas caracterizados por apresentarem falhas auto anunciáveis, em muitos casos as falhas não são auto anunciáveis e só são descobertas quando o sistema passa por alguma inspeção ou é submetido a outras perturbações.

De acordo com Moubray (1997), as falhas ocultas chegam a cerca de 50% do total de falhas em um sistema moderno e podem representar grandes problemas a serem resolvidos pelos gestores de manutenção.

2.3 Políticas de inspeção para sistemas sujeitos a falha oculta

Uma política de inspeção pode ser compreendida como um procedimento de checagem, realizado para averiguar o estado operacional de um sistema. Isto inclui informações sobre qual sistema inspecionar, como realizar as inspeções, qual a periodicidade das inspeções, com que eficácia as inspeções deverão ocorrer, quem deve realizar as inspeções, etc. French e Geldermann (2005) citam que os termos “política” e “estratégia” são utilizados por alguns autores para se referirem a planos de contingência, ou seja, ações que especificam respostas a eventos potenciais que podem ocorrer no futuro.

O objetivo das ações de inspeção é detectar se um sistema está em pleno funcionamento ou não e, assim, executar ações de manutenção, se necessárias, para garantir um certo nível de disponibilidade do sistema. Neste sentido, as políticas de inspeção são geralmente aplicadas em sistemas cujas falhas não são auto anunciáveis (ou seja, falhas ocultas ou do tipo *soft*) e só podem ser detectadas, preventivamente, por meio de inspeções ou testes. Se nenhum plano de inspeção for estabelecido para detectar possíveis falhas ocultas no sistema, em especial para sistemas de proteção, sérias consequências ou desastres podem ocorrer (SEYEDHOSSEINI; MOAKEDI; SHAHANAGHI, 2018; TAGHIPOUR; BANJEVIC; JARDINE, 2010; TANG *et al.*, 2013).

Diferentes autores utilizam os termos “inspeção” e/ou “teste” para se referirem as ações responsáveis pela detecção de falhas ocultas. No entanto, de um modo geral, compreende-se que em uma ação de inspeção são realizados testes de funcionamento para assegurar que o sistema está disponível para atender as demandas reais. Dessa forma, por razões de simplificação, será utilizado neste trabalho o termo “inspeção” para se referir a quaisquer ações que visam detectar, preventivamente, as falhas ocultas de um sistema.

Uma política de inspeção pode ser definida para ocorrer sob diferentes intervalos. Tang *et al.* (2013) citam que estes intervalos podem ser idênticos (inspeção periódica) ou diferentes (inspeção sequencial ou não periódica). Enquanto a inspeção periódica ocorre sempre com o mesmo intervalo de tempo, a inspeção sequencial usa as informações de inspeções anteriores para determinar o próximo cronograma de inspeção.

Tang *et al.* (2013) afirmam que aplicar inspeções periódicas é uma prática bastante comum no ramo industrial. E, recentemente, Seyedhosseini; Moakedi e Shahanaghi (2018)

reforçaram esta afirmação citando que a inspeção periódica permanece sendo uma das estratégias de manutenção efetiva atualmente utilizada na indústria.

As políticas de inspeção podem ser definidas de outras maneiras, como, por exemplo, com base em calendário, com base na idade do sistema, em duas fases e a partir de oportunidades:

- **Inspeção baseada em calendário:** é caracterizada por ocorrer periodicamente com base em intervalos de calendário fixos. Por exemplo, toda segunda-feira (ou seja, uma vez por semana) (TANG *et al.*, 2013).
- **Inspeção baseada na idade:** é caracterizada por ocorrer com intervalos fixos de idade, onde os tempos gastos com a inspeção e reparos/substituições não são incluídos no intervalo de inspeção. Assim, o tempo entre uma inspeção e outra pode variar de acordo com o tempo gasto com as ações necessária (duração da inspeção e de reparos/substituição) (TANG *et al.*, 2013).
- **Inspeção de duas fases:** é um procedimento com dois intervalos de inspeção distintos, T_1 e T_2 , que se adaptam às mudanças de confiabilidade do sistema. Quando o objetivo é detectar falhas "precoce", a primeira fase de inspeções ocorre com intervalos de inspeção menores, ou seja, $T_1 < T_2$. No entanto, a frequência de inspeção é a oposta, $T_1 > T_2$, nos casos em que as falhas devido desgaste assumem uma importância maior (BERRADE, 2012).
- **Inspeção oportunista:** é caracterizada por realizar inspeções quando o sistema passa por algum reparo, ou seja, aproveita a oportunidade gerada pela ação de reparo para realizar uma inspeção (TAGHIPOUR; BANJEVIC, 2012).

2.4 Políticas de manutenção para sistemas sujeitos a falha oculta

Políticas de manutenção envolvem ações preventivas e corretivas, que visam manter ou estender a vida útil dos equipamentos controlando suas falhas e degradações, bem como restaurando sua condição operacional a um nível aceitável. Enquanto a manutenção preventiva busca retardar o processo de degradação de diferentes sistemas, estruturas ou componentes em estado de funcionamento para prolongar sua vida útil, a manutenção corretiva visa reestabelecer o estado operacional do equipamento após sua falha, ou seja, depois de ser verificado que o equipamento não está executando sua função pretendida (KANČEV; ČEPIN; GJORGIEV, 2014).

Segundo Pham e Wang (1996), a manutenção é classificada de acordo com o grau de restauração gerado sobre as condições operacionais do sistema após a ação de manutenção. Essas classes são definidas a seguir, na Tabela 1:

Tabela 1 – Tipos de manutenção

Classificação da Manutenção	Definição
Reparo perfeito ou manutenção perfeita	Restaura as condições de operação do sistema ao estado de tão bom quanto novo (<i>AGAN – As Good As New</i>). Ou seja, após uma manutenção perfeita, o sistema passa a ter a mesma distribuição de vida útil e função de taxa de falha que uma unidade nova. Geralmente, a substituição de um sistema falhado por um novo é caracterizada como um reparo perfeito.
Reparo mínimo ou manutenção mínima	Restaura as condições de operação do sistema ao estado de tão ruim quanto velho (<i>ABAO – As Bad As Old</i>). Essa ação é responsável apenas por fazer o sistema voltar a funcionar, sem introduzir melhorias a sua condição. Ou seja, após um reparo mínimo, à taxa de falha do sistema será a mesma que ele tinha imediatamente antes de falhar.
Reparo imperfeito ou manutenção imperfeita	Restaura as condições de operação do sistema a um estado entre <i>AGAN</i> e <i>ABAO</i> . Ou seja, uma ação de manutenção imperfeita não torna um sistema tão bom quanto novo, mas melhora sua condição. Essa ação é tida como um reparo geral que pode incluir dois casos extremos: reparo mínimo e perfeito.
Pior Reparo ou manutenção	Aumenta a taxa de falha do sistema (ou sua idade real), mas o sistema não falha. Portanto, após esse tipo de ação, a condição de operação do sistema fica pior do que estava antes de sua falha. Geralmente, isso ocorre quando a reparação é incompleta ou causa algum erro.
Pior conserto ou manutenção	Ação de manutenção que faz o sistema falhar ou quebrar de maneira não deliberada.

Fonte: Adaptado de Pham e Wang (1996)

Além das classificações citadas na Tabela 1, Ahmadi *et al.* (2016) afirmam que o sistema pode assumir também uma condição de “melhor do que novo” se a ação de reparo realizar uma grande modificação no sistema, como, por exemplo, alterações em suas características de fábrica.

Quando existe a possibilidade de reparar um sistema a algum grau, como descrito na Tabela 1, diz-se que o sistema é reparável. Portanto, os sistemas reparáveis são aqueles que após apresentar alguma falha, de um ou mais de seus componentes, podem ser reparados e voltar a desempenhar normalmente suas funções. Contudo, dependendo da qualidade ou eficácia da ação do reparo, a condição das unidades reparadas pode variar, assumindo um

determinado estado de acordo com o tipo de reparação realizada (ASCHER; FEINGOLD, 1984; MODARRES, 2006).

Uma das maneiras de estimar a indisponibilidade de um sistema de proteção é baseando-se em sua confiabilidade. Nas subseções a seguir, são apresentadas as respectivas funções de confiabilidade e indisponibilidade utilizadas no Modelo 2 (Capítulo 4).

2.4.1 Função de confiabilidade de sistemas reparáveis

Para modelar a confiabilidade de sistemas reparáveis, Ahmadi e Kumar (2011) afirmam que é necessário utilizar o processo de ponto estocástico, que, segundo Modarres (2006), trata-se de eventos discretos que vão ocorrendo ao longo do tempo até gerar a falha do sistema. Além disso, Rausand e Høyland (2004) discutem quatro processos para a análise da confiabilidade: Processo de Poisson Homogêneo (PPH), Processo de Renovação (PR), Processo de Poisson Não Homogêneo (PPNH) e Processo de Reparação Imperfeita (PRI). Esses processos são conhecidos como processos de contagem e referem-se a contagem de falhas que chegam aleatoriamente ao sistema. Basicamente, a diferença entre estes três processos é de que:

- Quando se usa PPH ou PR, assume-se que é realizado um reparo perfeito ou uma substituição, deixando o sistema reparado em um estado de “tão bom quanto novo”;
- Quando se usa PPNH, assume-se que o reparo realizado é mínimo, deixando o sistema reparado em um estado semelhante ao que estava brevemente antes de falhar, ou seja “tão ruim quanto antigo”;
- Quando se usa PRI, assume-se que o estado do sistema após o reparo varia entre “tão bom quanto novo” e tão ruim quanto antigo”.

Enquanto os PPH descrevem uma sequência de variáveis aleatórias exponenciais, distribuídas de forma independente e idêntica (DII), onde a probabilidade de ocorrência de eventos em qualquer período é independente do que ocorreu em períodos anteriores, as variáveis aleatórias, descritas pelos PPNH, não são distribuídas de forma independente, tampouco idêntica. Enquanto no PPH a taxa de ocorrência das falhas é constante, no PPNH a taxa varia com o tempo. Normalmente, utiliza-se PPNH para modelar sistemas reparáveis sujeitos a reparação mínima, visto que a probabilidade de falha do item tende a aumentar com o tempo (RAUSAND; HØYLAND, 2004).

De acordo com Ahmadi e Kumar (2011), a hipótese de os dados de falhas serem DII, para maioria dos itens reparáveis e envelhecidos, não condiz com a realidade, logo, uma abordagem mais adequada deve ser utilizada para modelar a probabilidade de falha de um

conjunto de dados não-DII. Existem diversas abordagens para tal, contudo, neste trabalho utilizamos o processo de lei do poder, em razão do mesmo não contradizer a realidade. Para maiores detalhes a respeito de tal processo, recomenda-se uma leitura do trabalho de Klefsjö e Kumar (1992).

A taxa de ocorrência de falha (TOF) do PPNH na lei do poder é definida, de acordo com Rigdon e Basu (2000) e Rausand e Høyland (2004), da seguinte forma:

$$h(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (2.1)$$

E, portanto, a TOF cumulativa será:

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} \quad (2.2)$$

Onde β é o parâmetro de forma, cujo valor determina a forma da distribuição; α corresponde ao parâmetro de escala; e t o tempo.

Dessa forma, considerando o PPNH, as funções de confiabilidade e probabilidade de falha, $R(t)$ e $F(t)$, até o instante de tempo “ t ”, são definidas da seguinte forma:

$$R(t) = e^{-H(t)} = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (2.3)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (2.4)$$

Porém, para estabelecer a política de inspeção é importante saber qual a probabilidade de falha no instante de tempo t_2 , $F(t_2)$, se no instante de tempo t_1 a unidade tiver sido inspecionada e encontrada em estado funcional. Assim, a probabilidade condicional do item falhar em t_2 , dado que é funcional em t_1 , pode ser definida da seguinte forma:

$$\Pr(t_2|t_1) = \frac{F(t_2) - F(t_1)}{R(t_1)} = 1 - \frac{R(t_2)}{R(t_1)} = 1 - e^{[H(t_1) - H(t_2)]} \quad (2.5)$$

Ou seja, supondo que um item seja inspecionado a cada T unidades de tempo ($1T, 2T, 3T \dots NT$), a probabilidade condicional de falha na N -ésima inspeção (NT), dado que a unidade é funcional na inspeção anterior ($(N-1)$), será:

$$F_N(t) = 1 - \exp \left[\left(\frac{(N-1)T}{\alpha} \right)^{\beta} - \left(\frac{(N-1)T + t}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (2.6)$$

Semelhantemente à Equação (2.6), a probabilidade condicional de sobrevivência na N -ésima inspeção (NT), dado que a unidade é funcional na inspeção anterior ($(N-1)$), será:

$$R_N(t) = \exp \left[\left(\frac{(N-1)T}{\alpha} \right)^{\beta} - \left(\frac{(N-1)T + t}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (2.7)$$

Sendo t o tempo referente a N -ésima inspeção dentro do ciclo de renovação.

2.4.2 Função de indisponibilidade de sistemas sujeitos a falha oculta

De acordo com Modarres (2006), a indisponibilidade de sistemas de proteção é medida, normalmente, por meio da função *MFDT* (*Mean Fractional Dead Time*), que representa a fração média de tempo pela qual o sistema permanece indisponível, deixando de exercer sua função, que é evitar a ocorrência de eventuais acidentes.

Ebeling (2010) declara que as ações de inspeção não são capazes de melhorar a confiabilidade do sistema, mas podem melhorar sua disponibilidade. Isso porque, dependendo dos intervalos de inspeção, as falhas ocultas podem ser detectadas e corrigidas pouco tempo depois de terem ocorrido, o que, conseqüentemente, faria a indisponibilidade do sistema ser pequena.

Segundo Ebeling (2010), Vaurio (1997) e Rausand e Vatn (1998), as funções de disponibilidade e indisponibilidade são equivalentes as funções $R_N(t)$, dada pela Equação (2.7), e $F_N(t)$, dada pela Equação (2.6), respectivamente. Dessa forma, a indisponibilidade média no N -ésimo ciclo de inspeção, com inspeções a cada T unidades de tempo, é dada pela Equação (2.8).

$$MFDT_{(T,N)} = \frac{1}{T} \int_0^T F_N(t) dt \quad (2.8)$$

Ou seja,

$$MFDT_{(T,N)} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(1 - \exp \left[\left(\frac{(N-1)T}{\alpha} \right)^\beta - \left(\frac{(N-1)T+t}{\alpha} \right)^\beta \right] \right) dt$$

2.5 Efeito das ações de inspeção e manutenção sobre a degradação do sistema

Atividades de inspeção e manutenção podem apresentar efeitos adversos sobre a condição do componente. Como consequência desses efeitos, a idade do componente, após uma atividade de inspeção ou manutenção, pode ser maior que sua idade imediatamente antes da realização das ações (MARTORELL; SANCHEZ; SERRADELL, 1999).

Kančev; Čepin e Gjorgiev (2014) citam que as ações de inspeção podem ter tanto efeitos positivos quanto negativos sobre a condição do sistema. O efeito positivo está relacionado a detecção de falhas ocultas, que limita o risco de acidentes, enquanto o efeito negativo (ou efeito adverso) refere-se aos danos indesejados que são causados ao sistema, como erros de inspeção, desgastes devido à realização de testes de funcionamento, tempos de indisponibilidade, etc. (KANČEV; ČEPIN; GJORGIEV, 2014; MARTÓN; SÁNCHEZ; MARTORELL, 2015).

Ações de manutenção também podem gerar efeitos positivos e negativos sobre a condição do sistema. Manutenções imperfeitas, por exemplo, na maioria dos casos geram um efeito positivo, pois imediatamente após sua execução a degradação do sistema é reduzida, de acordo com a eficácia da ação (MARTORELL; SANCHEZ; SERRADELL, 1999). No entanto, o efeito poderia ser considerado negativo em demais situações, onde a ação de manutenção piorasse a condição do sistema (DO *et al.*, 2015).

A eficácia das ações de manutenção imperfeita pode melhorar ao longo do tempo se práticas de melhoria contínua forem adotadas sobre as ações de manutenção. Com isso, apesar da manutenção imperfeita não restaurar o sistema ao estado de novo, o grau de redução sobre sua degradação/idade passa a ser maior a cada nova ação de manutenção.

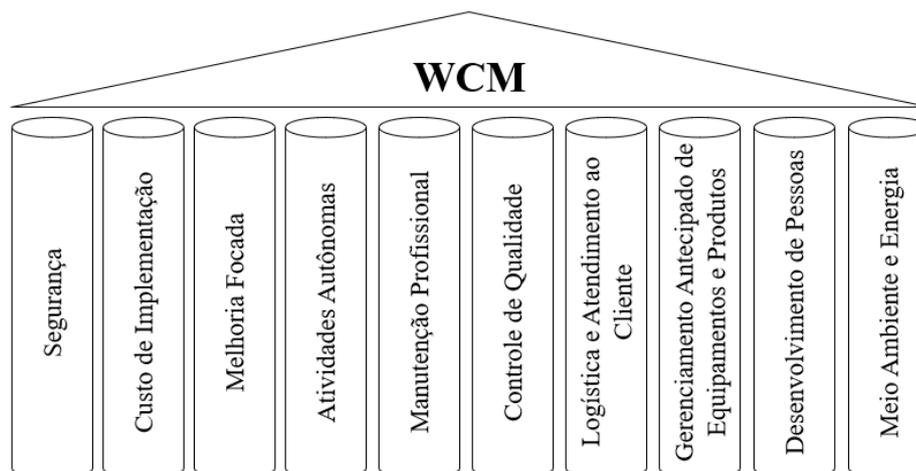
Algumas das práticas disseminadas pelo WCM (*World Class manufacturing*) são direcionadas especificamente a ações de manutenção, o que pode servir de base para que gestores de manutenção possam melhorar a eficácia das ações através da eliminação de ineficiências. Neste sentido, tais práticas são incorporadas ao processo de melhoria contínua que iremos demonstrar no Modelo 1 (Capítulo 4).

2.6 World Class Manufacturing

As empresas envolvidas nas práticas do WCM se concentram em melhorar as operações, eliminar o desperdício, gerenciar relacionamentos com os clientes, criar organizações enxutas, absorver práticas ecológicas, etc. Dessa forma, o WCM busca determinar qual conjunto de atividades precisa ser realizado, identificando o que é necessário para as empresas competirem globalmente. Isso, geralmente, leva a uma maior produtividade (HALEEM; QADRI; KUMAR, 2012; SALAHELDIN; EID, 2007; SCHONBERGER, 1986).

O WCM é composto por 10 pilares técnicos, que precisam ser desenvolvidos em paralelo para que a empresa alcance o padrão de excelência global (Figura 3) (DE FELICE; PETRILLO; MONFRE, 2015). A Tabela 2 descreve os motivos e objetivos de cada um dos pilares técnicos do WCM.

Figura 3 – Pilares técnicos do WCM



Fonte: Adaptado de De Felice; Petrillo e Monfre (2015)

Tabela 2 – Descrição dos pilares técnicos do WCM

Pilar Técnico	Motivo	Objetivo
Segurança	Melhoria contínua da segurança	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzir drasticamente o número de acidentes. - Desenvolver uma cultura de prevenção para melhorar a ergonomia do local de trabalho. - Desenvolver habilidades profissionais específicas.
Custo de Implementação	Análise das perdas e custos (perdas dentro dos custos)	<ul style="list-style-type: none"> - Identificar científica e sistematicamente os principais itens de perda no negócio de produção-logística do sistema. - Quantificar os potenciais benefícios econômicos e esperados. - Abordar os recursos e o compromisso com tarefas gerenciais com maior potencial.
Melhoria Focada	Prioridades das ações para gerenciar a perda identificada pela implantação de custos	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzir drasticamente as perdas mais importantes presentes na fábrica, eliminando ineficiências. - Eliminar atividades sem valor agregado, a fim de aumentar a competitividade do custo do produto. - Desenvolver competências profissionais específicas de resolução de problemas.
Atividades Autônomas	Melhoria contínua da planta e do local de trabalho	<ul style="list-style-type: none"> - Adotar a manutenção autônoma para melhorar a eficiência geral do sistema de produção através de políticas de manutenção executadas pelos condutores (especialistas em equipamentos). - Estabelecer a organização do local de trabalho para obter melhorias pela redução da degradação dos equipamentos e a remoção de perdas.
Manutenção Profissional	Melhoria contínua de tempo de inatividade e falhas	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentar a eficiência das máquinas usando técnicas de análise de falhas. - Facilitar a cooperação entre condutores (especialistas em equipamentos) e mantenedores (pessoal de manutenção) para alcançar falhas zero.
Controle de Qualidade	Melhoria contínua das necessidades dos clientes	<ul style="list-style-type: none"> - Garantir produtos de qualidade. - Reduzir a não conformidade. - Aumentar as habilidades dos funcionários.

Logística e Atendimento ao Cliente	Otimização de estoques	- Reduzir significativamente os níveis de estoques. - Minimizar o manuseio do material, mesmo com entregas diretas de fornecedores para a linha de montagem.
Gerenciamento Antecipado de Equipamentos e Produtos	Otimização do tempo de instalação e custos e otimização de recursos de novos produtos	- Colocar em funcionamento novas plantas conforme programado. - Garantir um arranque rápido e estável. - Reduzir o custo do ciclo de vida (LCC). - Projetar sistemas facilmente mantidos e inspecionados.
Desenvolvimento de Pessoas	Melhoria contínua das habilidades de funcionários e trabalhadores	- Garantir, através de um sistema estruturado de treinamento, habilidades e habilidades corretas para cada estação de trabalho. - Desenvolver os papéis de trabalhadores de manutenção, tecnólogos, especialistas, como treinamento de pessoal importante.
Meio Ambiente e Energia	Melhoria contínua do gerenciamento ambiental e redução do desperdício de energia.	- Atender aos requisitos e padrões de gestão ambiental. - Desenvolver uma cultura energética e reduzir os custos energéticos e perdas.

Fonte: Adaptado de De Felice; Petrillo e Monfre (2015)

Dentre as práticas do WCM, nosso maior interesse é discutir mais a fundo as práticas que tratam da manutenção. Todorović *et al.* (2013) citam que a manutenção representa uma das áreas mais importantes para uma empresa que opera dentro da estratégia WCM.

Segundo Mckone; Schroeder e Cua (2001), a Manutenção Produtiva Total (TPM) é tida como um dos componentes críticos do WCM. Portanto, supõe-se que as empresas que implementam a TPM, além de obter melhorias sob as ações de manutenção, melhoram também seu desempenho de produção.

Chan *et al.* (2005) citam que, normalmente, os problemas de manutenção que precisam ser tratados são:

- Manutenção proativa insuficiente;
- Repetição frequente de problemas;
- Repetição errônea do problema;
- Boas práticas de manutenção não instaladas;
- Manutenções Preventivas desnecessárias e conservadoras;
- Justificativas infundadas para ações de Manutenção Preventiva;
- Falta de visibilidade do programa de manutenção;
- Aceitação de insumos OEM (*Original Equipment Manufacturer*) sem verificar sua procedência;
- Variabilidade de PM entre unidades do mesmo tipo ou semelhantes;

- Escassez de manutenção preditiva.

A TPM é baseada em relações sinérgicas entre produção e manutenção com foco na melhoria contínua da qualidade do produto, eficiência operacional, garantia de capacidade e segurança. Seu objetivo é aumentar a disponibilidade e eficácia dos equipamentos, por meio da minimização de insumos (melhorando e mantendo equipamentos a um nível ótimo para reduzir o custo do ciclo de vida) e investindo em recursos humanos, de modo a melhorar a utilização dos equipamentos (CHAN *et al.*, 2005; HALEEM; QADRI; KUMAR, 2012).

Segundo De Felice; Petrillo e Monfre (2015), para se atingir um desempenho de classe mundial, faz-se necessário a utilização de uma série de ferramentas que visam abranger todas as áreas de uma organização. Dentre essas ferramentas, algumas em particular podem contribuir para obtenção de melhorias consideráveis na área da manutenção. Algumas dessas ferramentas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Ferramentas para melhoria da manutenção

Ferramentas	Descrição
5G	É uma metodologia para a descrição e análise de um fenômeno de perda (defeitos, defeitos de falhas, etc.). É baseada nos fatos e no uso dos 5 sentidos.
4M ou 5M	É usada pela lista de possíveis fatores (causas, sub-causas) que dão origem ao fenômeno. Para o 4M, as causas são agrupadas em 4 categorias: Métodos; Materiais; Máquinas; Mão de obra. E para o 5M, há o mesmo 4M mais o quinto que é o ambiente.
5W + 1H	É usada para garantir uma análise completa de um problema em todos os seus aspectos fundamentais. As questões correspondentes ao 5W e 1H são: Quem? O que? Por quê? Onde? Quando? Como?
AM Tag	É uma folha que se aplica na máquina para o preenchimento de ocorrências, a fim de relatar qualquer anomalia detectada.
PM Tag	É uma folha que, adequadamente preenchida, é usada para relatar qualquer anomalia detectada para manutenção profissional.
Pirâmide de Heinrich	É usada para classificar os eventos que têm impacto na segurança, como fatalidades, medicamentos, quase acidentes, acidentes, condições perigosas e práticas inseguras ao longo do tempo.
Ciclos de Limpeza	São utilizados para atividades de Manutenção Autônoma, Organização no Local de Trabalho e Manutenção Profissional.
Ciclos de Inspeção	São utilizados para atividades de Manutenção Autônoma, Organização no Local de Trabalho e Manutenção Profissional.
Ciclos de Manutenção	São utilizados para atividades de Manutenção Autônoma e Manutenção Profissional.
Ciclos de Controle	São utilizados para atividades de Manutenção Autônoma, Organização no Local de Trabalho e Manutenção Profissional.

FEMEA	É usada para impedir os modos de falha potenciais.
Kaizen	É um processo diário, cuja finalidade vai além da simples melhoria de produtividade. É também um processo que, quando feito corretamente, humaniza o ambiente de trabalho, elimina o trabalho excessivamente difícil.
Análise MURA	Análise de operações irregulares
Análise MUDA	Análise de perdas
OPL (lição de um ponto)	É uma técnica que permite um foco simples e eficaz em pouco tempo sobre o objeto do treinamento.
<i>Standard procedure for work</i>	Procedimento padrão para o trabalho.
Poka-Yoke	É uma técnica de prevenção para evitar possíveis erros humanos em desempenho de qualquer atividade produtiva.
TWTTP (o caminho para ensinar as pessoas)	É uma entrevista em 4 questões para testar o nível de treinamento na operação a ser realizada.
QA Matrix (Matrix Quality Assurance)	É uma ferramenta usada para restaurar, manter e melhorar os padrões operacionais de trabalho garantindo zero defeitos.
QM Matrix (Matrix Maintenance Quality)	É uma ferramenta usada para definir e manter as condições de operação das máquinas que garantem o desempenho da qualidade desejada.
QuOA (Quality Operation Analysis)	Análise preventiva das etapas do trabalho para garantir a qualidade.
X Matrix	É uma ferramenta para melhoria de qualidade, que permite comparar dois pares de listas de itens para destacar as correlações entre uma lista e as duas listas adjacentes. Matriz X para relacionar o modo de defeito, fenômeno, seção de equipamentos e componentes de qualidade.

Fonte: Adaptado de De Felice; Petrillo e Monfre (2015)

Em geral, a adoção de práticas que visam a melhoria contínua das ações de manutenção possibilita um maior controle sobre a degradação e indisponibilidade do sistema. A relevância dessas práticas passa a ser ainda maior quando lidamos com sistemas de proteção, em razão de sua disponibilidade ser fundamental para prevenção de perdas. Manter um sistema de proteção sempre disponível para atender demandas aleatórias é uma das maiores preocupações dos gestores de manutenção, no entanto definir as políticas de inspeção e manutenção destes sistemas pode não ser uma tarefa fácil quando as decisões precisam ser tomadas com base em mais de um critério. Nestas situações, o decisor (gestor de manutenção) pode ter dificuldade em definir as políticas que atendam adequadamente todos os critérios considerados e, portanto, o uso de métodos de apoio a decisão multicritério se faz necessário.

2.7 Métodos de Apoio a Decisão Multicritério

Políticas de inspeção e manutenção podem ser designadas com o foco em diferentes objetivos, como a minimização de custos, indisponibilidade, criticidades de saúde e segurança, meio ambiente e recuperação operacional, maximização de disponibilidade, confiabilidade, etc., contudo, em situações onde a definição dessas políticas precisa ser realizada de acordo com mais de um objetivo (normalmente conflitantes entre si) é recomendado o uso de métodos de análise de decisão multicritério (MCDA - *Multiple-criteria Decision Analysis*) (DA SILVA; LOPES, 2018; DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

O elemento central de qualquer método MCDA é o modelo de decisão que agrega as medidas dos critérios junto as informações de preferência do(s) decisor(es) para avaliar as alternativas do problema (EHRGOTT; FIGUEIRA; GRECO, 2010). O uso de tais métodos apresenta vantagens como: a construção de uma boa base de diálogo entre diferentes agentes que integram o processo decisório, a incorporação das preferências dos decisores e a capacidade de avaliar a solução sob diferentes objetivos (CAVALCANTE; LOPES, 2014).

Em problemas de decisão da vida real, boa parte das informações relacionadas ao problema é incerta ou imprecisa, de modo que algumas informações importantes podem acabar não sendo devidamente representadas. Dentre os diferentes métodos MCDA propostos na literatura, alguns se dedicam a tratar dessas incertezas, como, por exemplo, os métodos da família SMAA (*Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis*), que são destinados a problemas onde a incerteza é tão significativa que precisa ser considerada no processo decisório (EHRGOTT; FIGUEIRA; GRECO, 2010).

2.7.1 O método SMAA-2

O SMAA-2 é um dos métodos da família SMAA, desenvolvido para situações em que tanto os valores dos critérios quanto de seus pesos não são precisamente conhecidos. Desse modo, o SMAA-2 surge como uma boa opção para auxiliar decisores em problemas onde há incerteza ou imprecisão sobre as informações, podendo ser utilizado para escolher a “melhor” alternativa, escolher um conjunto de “melhores” alternativas ou ordenar as alternativas (LAHDELMA; SALMINEN, 2001). Várias aplicações reais já foram realizadas com o SMAA-2 em diferentes setores envolvendo informações parciais, incertas e/ou inexistentes como para o desenvolvimento de portos de cargas (HOKKANEN; LAHDELMA; SALMINEN, 1999); para limpeza de solos poluídos (HOKKANEN; LAHDELMA; SALMINEN, 2000); para o planejamento de elevadores (TERVONEN; HAKONEN;

LAHDELMA, 2008); para centralização de cargas multimodal em aeroportos (MENOUE *et al.*, 2010); entre outras.

No SMAA, o problema de decisão é representado por um conjunto de m alternativas $A = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ a serem avaliadas em n critérios, e a estrutura de preferências dos decisores é representada por uma utilidade de valor real ou função utilidade $u(x_i, \mathbf{w})$. Os valores de critérios incertos ou imprecisos são representados por uma matriz de variáveis estocásticas ξ_{ij} com função de densidade conjunta $f(\xi)$ no espaço de critérios $\mathbf{X} \subseteq \mathbb{R}^{m \times n}$. As preferências desconhecidas ou parcialmente conhecidas dos decisores são representadas por uma distribuição de peso com função de densidade conjunta $f(\mathbf{w})$ no espaço de pesos viáveis W . Dessa forma, a modelagem se torna mais flexível, uma vez que diferentes tipos de informações de preferência podem compor uma mesma matriz de consequências. Os decisores podem fornecer pesos exatos, intervalos de pesos ou a ordem de prioridade para os critérios. No caso de não haver informação de preferência, usa-se uma distribuição de peso uniforme em W , onde $f(\mathbf{w}) = 1/\text{vol}(W)$ (LAHDELMA; MAKKONEN; SALMINEN, 2009). Com W representado na Equação (2.9):

$$W = \left\{ \mathbf{w} \in \mathbb{R}^n \mid \mathbf{w} \geq 0 \text{ e } \sum_{j=1}^n w_j = 1 \right\} \quad (2.9)$$

A função utilidade é usada para mapear os critérios estocásticos e as distribuições de peso em distribuições de utilidade $u(\xi_i, \mathbf{w})$. A ordem de cada alternativa é definida como um número inteiro, do melhor (=1) para o pior (=m) *rank*, através da função de ordenação demonstrada na Equação (2.10) (LAHDELMA; MAKKONEN; SALMINEN, 2009).

$$\text{rank}(x_i, \xi, \mathbf{w}) = 1 + \sum_{k=1}^m \rho(u(\xi_k, \mathbf{w}) > u(\xi_i, \mathbf{w})) \quad (2.10)$$

Onde $\rho(\text{verdadeiro})=1$ e $\rho(\text{falso})=0$.

O SMAA-2 se baseia na análise inversa do espaço de pesos, que tem como objetivo apresentar os pesos dos critérios que tornam uma alternativa x_i a mais preferida, ou a colocam em um *rank* específico. Portanto, a análise dos conjuntos de pesos favoráveis de *rank* de cada alternativa, Equação (2.11), indica que qualquer vetor de peso $\mathbf{w} \in \mathbf{W}_i^r(\xi)$ resulta em utilidades para cada alternativa do problema, que fazem a alternativa x_i obter o *rank* r (LAHDELMA; MAKKONEN; SALMINEN, 2009).

$$\mathbf{W}_i^r(\xi) = \{\mathbf{w} \in \mathbf{W} \mid \text{rank}(x_i, \xi, \mathbf{w}) = r\} \quad (2.11)$$

Diferentes resultados para a análise podem ser gerados pelo SMAA-2. Contudo, neste trabalho, estamos interessados nos índices de aceitabilidade de *rank* e nos vetores de peso central das alternativas.

Os índices de aceitabilidade de *rank*, b_i^r , medem a variedade de diferentes preferências que concede a alternativa x_i o *rank* r . Representam a parcela do conjunto de pesos viáveis que tornam x_i aceitável para um *rank* específico. Esse índice é encontrado pela Equação (2.12) (LAHDELMA; MAKKONEN; SALMINEN, 2009).

$$b_i^r = \int_{\mathbf{x}} f(\xi) \int_{\mathbf{w}_i^r(\xi)} f(\mathbf{w}) d\mathbf{w} d\xi \quad (2.12)$$

As melhores alternativas apresentam altos índices de aceitação para os melhores *ranks*. Os índices b_i^r variam entre 0 e 1, onde $b_i^r = 0$ indica que nenhum dos pesos viáveis são favoráveis a alternativa x_i para o *rank* r e $b_i^r = 1$ indica que 100% do conjunto de pesos viáveis são favoráveis a alternativa x_i para *rank* r (LAHDELMA; MAKKONEN; SALMINEN, 2009).

O vetor de peso central, \mathbf{w}_i^c , fornece os pesos que apoiam uma alternativa x_i a ser posicionada no melhor *rank*. Esses vetores podem ser apresentados aos decisores com objetivo de demonstrar como diferentes pesos podem implicar em decisões distintas. O vetor de peso central é obtido pela Equação (2.13) (LAHDELMA; MIETTINEN; SALMINEN, 2003).

$$\mathbf{w}_i^c = \int_{\mathbf{x}} f(\xi) \int_{\mathbf{w}_i^1(\xi)} f(\mathbf{w}) \mathbf{w} d\mathbf{w} d\xi / b_i^1 \quad (2.13)$$

O próximo capítulo aborda o contexto das falhas ocultas de modo mais acurado, por meio de uma revisão da literatura, que mostra as relações entre trabalhos publicados nesta área.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura foi realizada com base em artigos que propuseram algum modelo de decisão voltado a definição de políticas de inspeção e/ou manutenção para sistemas cujas falhas são ocultas. A busca por tais artigos ocorreu nas bases *Science Direct* e *Web Of Science* por meio dos termos “*hidden failure*”, “*inspection policy*”, “*maintenance policy*”, “*protection system*”, “*standby system*”, “*soft failure*” e “*unrevealed failure*”. Ao todo, 54 artigos foram revisados, entre 1979 e 2018, dos quais 23 estão associados a políticas de inspeção para sistemas sujeitos a falha oculta e 31 a políticas de manutenção imperfeita para sistemas sujeitos a degradação. A maioria dos artigos revisados foram publicados em periódicos com alto fator de impacto. A classificação das publicações é apresentada na Tabela 4.

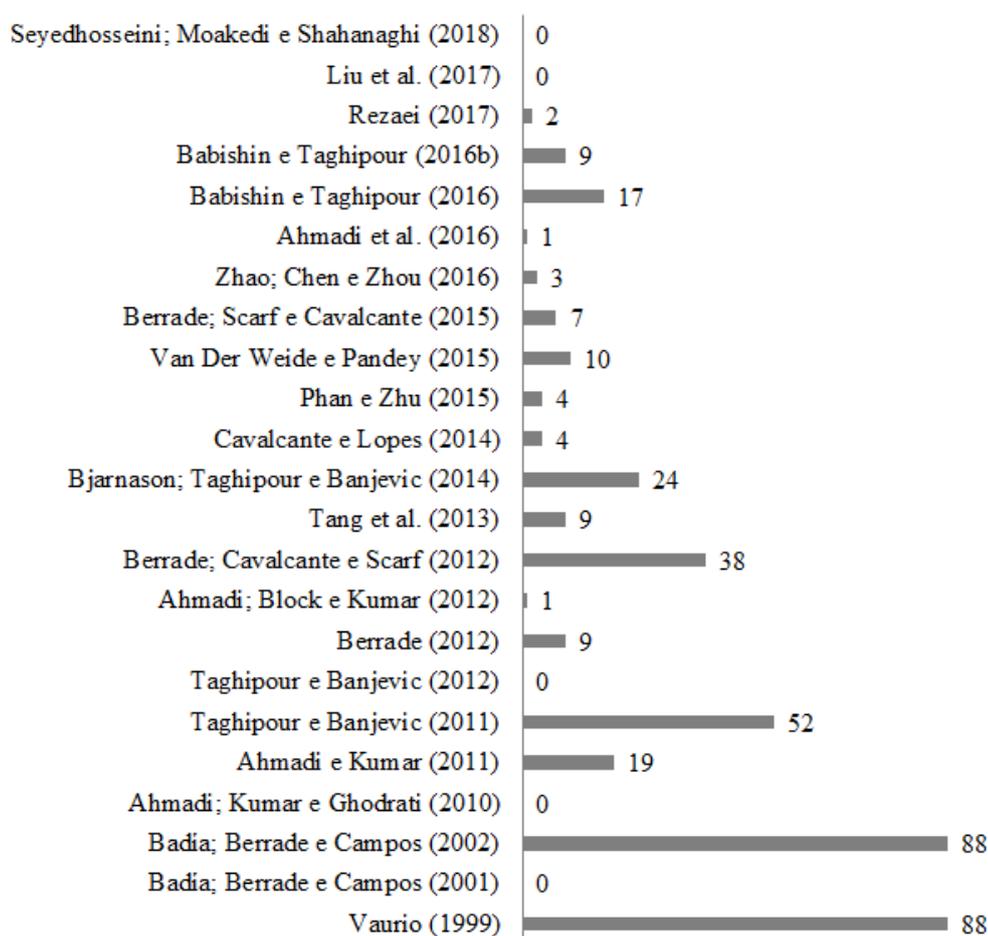
Tabela 4 – Fator de impacto e classificação das publicações no último quadriênio (2013 - 2016) na Área de Engenharias III

Número de Artigos	Meio de Publicação	Classificação CAPES	Fator de Impacto
15	<i>Reliability Engineering & Systems Safety</i>	A1	4.139
12	<i>IEEE Transactions On Reliability</i>	A1	2.729
4	<i>European Journal Of Operational Research</i>	A1	3.428
3	<i>Mathematical Problems In Engineering</i>	B1	1.145
2	<i>Applied Mathematical Modelling</i>	A2	2.617
2	<i>Journal Of Intelligent Manufacturing</i>	A2	3.667
1	<i>International Journal, Advanced Manufacturing Technology</i>	B1	2.601
1	<i>Case Studies In Engineering Failure Analysis</i>	B3	1.549
1	<i>Microelectronics And Reliability</i>	B1	1.236
1	<i>Journal Of Statistical Planning And Inference</i>	B1	0.814
1	<i>Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part O: Journal Of Risk And Reliability</i>	B1	1.373
1	<i>International Journal Of Production Research</i>	A2	2.623
1	<i>Computers & Industrial Engineering</i>	A2	3.195
1	<i>IEEE Transactions On Automation Science And Engineering</i>	A2	2.696
1	<i>Journal Of Manufacturing Systems</i>	A2	3.699
1	<i>Chinese Journal Of Aeronautics</i>	B1	1.614
1	<i>Naval Research Logistics</i>	-	0.989
1	<i>Applied Probability Trust</i>	-	-
1	<i>IFAC - International Federation Of Automatic Control</i>	-	-
1	<i>ESREL - European Safety and Reliability Conference</i>	-	-
1	<i>International Journal Of Reliability, Quality And Safety Engineering</i>	-	-
1	<i>AIIE Transactions</i>	-	-

Fonte: O autor (2019)

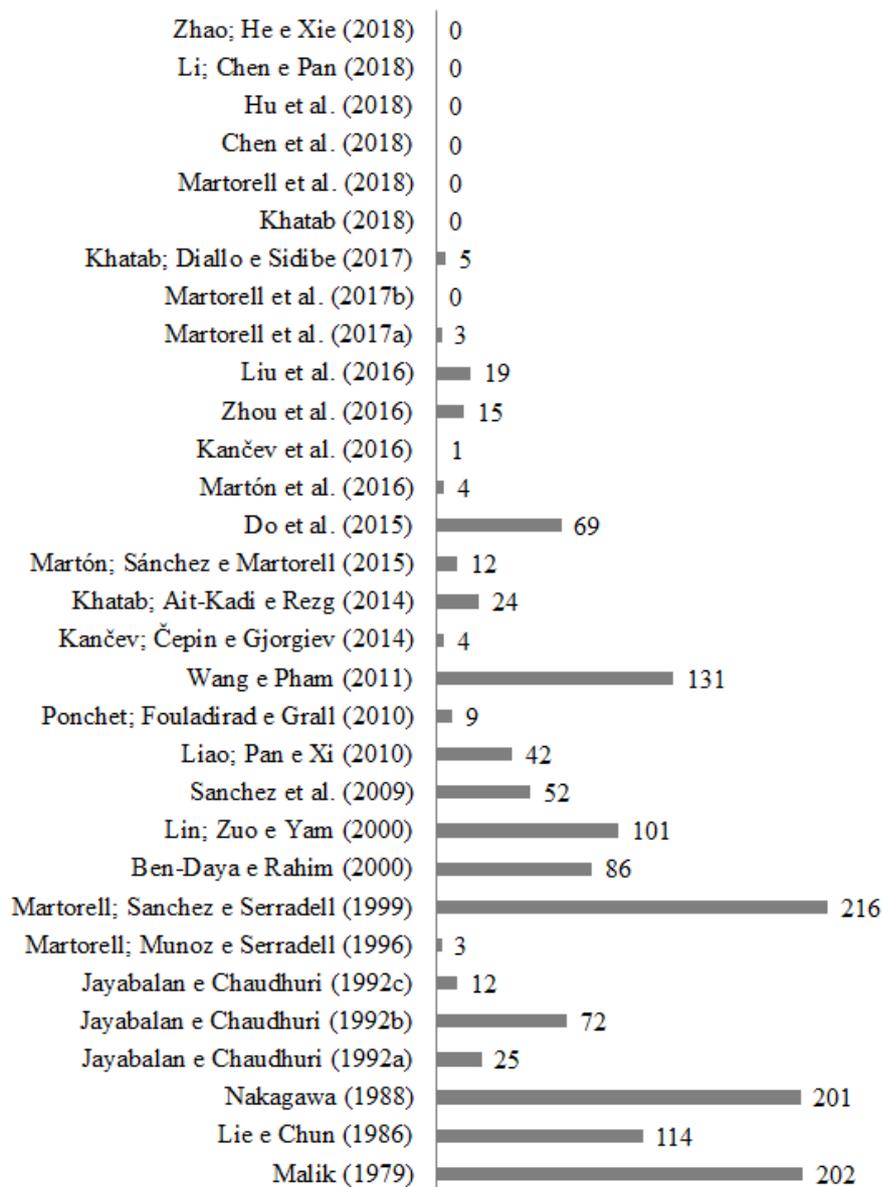
Como mostra a Tabela 4, dentre os artigos revisados, 31 foram publicados em periódicos da categoria A1, 8 nas categorias A2 e B1, 1 na categoria B3 e 6 dos artigos não foram identificados na classificação do último quadriênio (2013 - 2016) na Área de Engenharias III. As Figuras Figura 4 Figura 5 apresentam esses artigos em paralelo ao número de vezes em que cada um foi citado por outros trabalhos, de acordo com a revista em que foi publicado.

Figura 4 – Número de citações dos artigos associados a políticas de inspeção para sistemas sujeitos a falha oculta



Fonte: O autor (2019)

Figura 5 – Número de citações dos artigos associados a políticas de manutenção imperfeita para sistemas sujeitos a degradação



Fonte: O autor (2019)

O objetivo foi analisar artigos da literatura sob duas perspectivas: Em primeira instância, analisar trabalhos publicados sobre políticas de inspeção para sistemas sujeitos a falha oculta com o propósito de obter uma visão geral a respeito de como diferentes pesquisadores propõe soluções para o tema estudado (falhas ocultas) e, posteriormente, analisar trabalhos publicados sobre políticas de manutenção imperfeita para sistemas sujeitos a degradação, visando identificar a maneira como os pesquisadores tratam a degradação de sistemas em geral (incluindo sistemas sujeitos a falha oculta) ao longo do tempo. A seguir, é

apresentada uma breve descrição dos artigos exibidos nas Figuras Figura 4 Figura 5, respectivamente.

3.1 Políticas de inspeção para sistemas sujeitos a falha oculta

Vaurio (1999) desenvolveu duas funções, uma de indisponibilidade e uma de custo, para componentes cujas falhas são ocultas, com objetivo de minimizar a taxa de custo total pela seleção adequada dos intervalos de inspeções e substituições, levando em consideração restrições de indisponibilidade máxima ou taxa de acidentes.

Badía; Berrade e Campos (2001) apresentaram uma política de inspeção para sistemas de componente único, sujeitos a falha oculta, considerando ações de inspeção imperfeitas, com o objetivo de definir o intervalo ótimo de inspeção para minimização de custos. O mesmo foi proposto por Badía; Berrade e Campos (2002), no entanto, para um sistema que alterna os períodos de operação e ociosidade, podendo apresentar falhas evidentes e ocultas.

Ahmadi; Kumar e Ghodrati (2010) desenvolveram uma função de custo para sistemas sujeitos a falha oculta e apresentaram um método gráfico para facilitar a identificação de risco e custo, com o objetivo de identificar o intervalo e o número de inspeções que minimize os custos e atenda as restrições de risco e requisitos de negócio ao mesmo tempo, levando em consideração inspeções periódicas e imperfeitas. Ahmadi e Kumar (2011) apresentaram uma proposta semelhante, levando em consideração inspeções perfeitas ao invés de imperfeita. E, posteriormente, Ahmadi *et al.* (2016) estenderam o modelo de Ahmadi e Kumar (2011) incluindo a consideração de eficácia sob as ações de manutenção.

Taghipour e Banjevic (2011) propuseram um modelo para definir a política ótima de inspeção de um sistema multicomponente, sujeito a falha oculta, levando em consideração inspeções periódicas sobre horizontes de tempo finito e infinito, bem como reparos mínimos ou substituição, com o objetivo de minimizar os custos.

Taghipour e Banjevic (2012) apresentaram dois modelos de otimização para componentes do tipo *hard* e *soft*, assumindo, no primeiro modelo, inspeções periódicas e oportunistas para os componentes do tipo *soft* e, no segundo modelo, apenas inspeções periódicas para os componentes do tipo *hard*, com o objetivo de definir o número e o intervalo de inspeção que minimizem os custos.

Berrade (2012) propôs uma política de inspeção para detectar a falha oculta de um sistema de componente único, considerando testes imperfeitos e inspeções em duas fases, com o objetivo de definir o intervalo e o número de inspeção de cada fase para minimizar custos.

Ahmadi; Block e Kumar (2012) desenvolveram uma metodologia para estabelecer a política de inspeção de componentes de aeronave, sujeitos a falha oculta, assumindo reparos mínimos e inspeções periódicas e perfeitas com o objetivo de identificar o intervalo de inspeção que minimize custos e risco e satisfaça as restrições de risco e requisitos de negócio.

Berrade; Cavalcante e Scarf (2012) propuseram dois modelos para definir as políticas de inspeção e substituição para um sistema de proteção, assumindo a possibilidade das inspeções e substituições serem imperfeitas, com o objetivo de avaliar o custo e a disponibilidade do sistema para diferentes intervalos de inspeção. Posteriormente, Berrade; Scarf e Cavalcante (2015) apresentaram uma proposta semelhante para um sistema de proteção, visando a minimização de custos pela determinação do intervalo e do número de inspeções.

Tang *et al.* (2013) apresentaram dois modelos de otimização, com o objetivo de maximizar a disponibilidade de sistemas sujeitos a falha oculta, considerando intervalos de inspeção periódicos e *downtimes* devido às ações de reparação, substituição e inspeção. No primeiro modelo, um reparo perfeito é realizado após uma inspeção, enquanto no segundo modelo, o sistema é minimamente reparado.

Bjarnason; Taghipour e Banjevic (2014) desenvolveram um modelo de otimização para um sistema com *k-out-of-n* componentes, sujeitos a falha oculta, assumindo inspeções periódicas e reparos mínimos ou substituição por peças sobressalentes, com o objetivo de definir o intervalo de inspeção e o nível de estoque de sobressalentes que minimize os custos.

Cavalcante e Lopes (2014) propuseram uma política de manutenção oportunista para um sistema de emergência, sujeito a falha oculta, visando atender simultaneamente os critérios de custo e disponibilidade, além de restrições orçamentárias.

Phan e Zhu (2015) apresentaram uma estrutura de otimização de estágio múltiplo para sistemas de infraestrutura geo-distribuídos, sujeitos a falha oculta, considerando intervalos de inspeção periódicos e assumindo reparos perfeitos, a fim de minimizar o custo total de inspeção e manutenção, além de satisfazer restrições orçamentárias e de recursos humanos.

Van Der Weide e Pandey (2015) propuseram um modelo de processo alternativo estocástico para analisar a indisponibilidade de um equipamento de segurança *standby*, considerando inspeções periódicas e perfeitas, bem como ações de manutenção preventiva baseada na idade do equipamento.

Zhao; Chen e Zhou (2016) desenvolveram um modelo de manutenção geral para sistemas multicomponentes dos tipos *hard* e *soft*, assumindo inspeções e manutenções oportunistas, com o objetivo de minimizar os custos pela definição dos intervalos de inspeção e substituição, assim como o número de falhas do componente *hard* para sua substituição.

Babishin e Taghipour (2016a) propuseram dois modelos de otimização para um sistema com componentes tipo *hard* e *soft*, considerando inspeções oportunistas e periódicas, além de reparos mínimos ou substituição. O objetivo é encontrar a política de manutenção ideal para todos os componentes e a inspeção periódica ideal para todo o sistema, de modo a minimizar os custos. Babishin e Taghipour (2016b) apresentaram uma proposta parecida, no entanto, levando em consideração três tipos de manutenção: reparo mínimo, substituição preventiva e substituição corretiva.

Rezaei (2017) propôs um modelo baseado em confiabilidade para um sistema com componentes tipo *hard* e *soft*, considerando intervalos de inspeção periódicos para os componentes *soft*, com possibilidade de reparos mínimos e perfeitos, e apenas reparos perfeitos para os componentes *hard*. O objetivo é encontrar o intervalo de inspeção ótimo para minimização dos custos.

Liu *et al.* (2017) apresentaram uma política de manutenção para um sistema multicomponente usando um método heurístico denominado “abordagem de intervalo de base” e levando em consideração inspeções perfeitas e substituição, com o objetivo de minimizar os custos por meio da determinação ideal dos intervalos de inspeção de cada componente do sistema.

Seyedhosseini; Moakedi e Shahanaghi (2018) desenvolveram um modelo matemático para política de inspeção de um sistema de dois componentes do tipo *hard* e *soft*, assumindo inspeções imperfeitas em intervalos periódicos e oportunistas, com o objetivo de encontrar o intervalo de inspeção periódico que minimize o custo total em um horizonte de tempo finito.

Um resumo sobre os artigos revisados nesta seção é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Resumo da literatura de políticas de inspeção em sistemas sujeitos a falha oculta

Artigo	Ano	Unidade	Inspeção	Frequência da Inspeção	Restauração após detecção de falha oculta	MP antes da Renovação	Frequência de Renovação	Objetivo	Restrição	Variável de Decisão
Vaurio	1999	Componente	Perfeita	Periódica	Perfeita	-	Após n inspeções ou sempre que uma falha for detectada	Custo e Disponibilidade	Indisponibilidade máxima ou Taxa de Acidente	Intervalo e número de inspeções
Badía; Berrade e Campos	2001	Sistema	Imperfeita	Periódica	Perfeita	-	Sempre que uma falha for detectada	Custo	-	Intervalo de inspeção
Badía; Berrade e Campos	2002	Sistema	Imperfeita	Periódica	Perfeita	-	Sempre que uma falha for detectada	Custo	-	Intervalo de inspeção
Ahmadi; Kumar e Ghodrati	2010	Componente	Imperfeita	Periódica	Mínima	-	Após n inspeções	Custo	Risco e Requisitos de negócios	Intervalo e número de inspeção
Ahmadi e Kumar	2011	Componente	Perfeita	Periódica	Mínima	-	Após n inspeções	Custo	Risco e Requisitos de negócios	Intervalo e número de inspeção
Taghipour e Banjevic	2011	Sistema	Perfeita	Periódica	Mínima ou Perfeita	-	Depende da idade	Custo	-	Intervalo de inspeção
Taghipour e Banjevic	2012	Componente	Perfeita	Periódica e oportunista	Mínima ou Perfeita	-	Depende da idade	Custo	-	Intervalo e número de inspeção
Berrade	2012	Sistema	Imperfeita	Duas fases	Perfeita	-	Apenas quando a falha for detectada	Custo	-	Intervalos de inspeção da 1 ^a e 2 ^a fase e número de inspeções
Ahmadi; Block e Kumar	2012	Componente	Perfeita	Periódica	Mínima	-	Após n inspeções	Custo e Risco	Risco e Requisitos de negócios	Intervalo de inspeção
Berrade; Cavalcante e Scarf	2012	Sistema	Imperfeita	Duas fases	Imperfeita	-	Após duas fases de inspeção	Custo e Disponibilidade	-	Intervalo e número de inspeção
Tang <i>et al.</i>	2013	Sistema	Perfeita	Periódica	Perfeita	-	Em cada inspeção	Disponibilidade	-	Intervalo de inspeção

Artigo	Ano	Unidade	Inspeção	Frequência da Inspeção	Restauração após detecção de falha oculta	MP antes da Renovação	Frequência de Renovação	Objetivo	Restrição	Variável de Decisão
Bjarnason; Taghipour e Banjevic	2014	Sistema	Perfeita	Periódica	Mínima ou Perfeita	-	Depende da idade	Custo	-	Intervalo de inspeção e nível de estoque
Cavalcante e Lopes	2014	Sistema	Perfeita	Periódica	Reparo ou Substituição	-	Depende da idade	Custo e Disponibilidade	Orçamento	Limites críticos associados ao intervalo de inspeção
Phan e Zhu	2015	Sistema	Perfeita	Periódica	Perfeita	-	Em cada inspeção	Custo	Recursos Humanos e Orçamento	Intervalo de inspeção
Van Der Weide e Pandey	2015	Equipamento	Perfeita	Periódica	Perfeita	-	Após n inspeções	Indisponibilidade	-	Intervalos de inspeção e manutenção
Berrade; Scarf e Cavalcante	2015	Sistema	Imperfeita	Periódica	Imperfeita	-	Após n inspeções	Custo	-	Intervalo e número de inspeção
Zhao; Chen e Zhou	2016	Sistema	Perfeita	Periódica incompleta	Mínima	-	Após um determinado tempo ou após n falhas	Custo	-	Número de falhas, período de substituição e intervalo de inspeção
Ahmadi <i>et al.</i>	2016	Sistema ou componente	Perfeita	Periódica	Mínima	Imperfeita	Após n manutenções	Custo	-	Intervalo e número de inspeção
Babishin e Taghipour	2016a	Sistema	Perfeita	Periódica e oportunista	Mínima	-	Após n falhas	Custo	-	Intervalo de inspeção
Babishin e Taghipour	2016b	Sistema	Perfeita	Periódica e oportunista	Mínima ou Substituição	-	Após n reparos	Custo	-	Intervalo de inspeção e número de reparos mínimos
Rezaei	2017	Sistema	Perfeita	Periódica	Mínima ou Perfeita	-	Depende da idade	Custo	-	Intervalo de inspeção
Liu <i>et al.</i>	2017	Sistema	Perfeita	Variável	Perfeita	-	Sempre que uma falha for detectada	Custo	-	Intervalo de inspeção
Seyedhosseini; Moakedi e Shahanaghi	2018	Sistema	Imperfeita	Periódica e oportunista	Mínima ou Perfeita	-	Depende da idade	Custo	-	Intervalo de inspeção

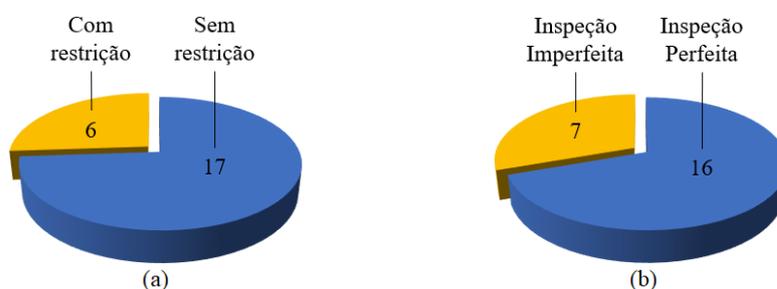
Fonte: O autor (2019)

3.1.1 Visão geral dos modelos

Dos 23 artigos analisados nesta seção (3.1), algumas considerações em comum foram identificadas e são apresentadas a seguir.

A Figura 6 mostra o número de artigos que consideraram algum tipo de restrição na modelagem do problema (gráfico (a)), assim como a eficácia assumida para as ações de inspeção (gráfico (b)). Dentre os 23 artigos, apenas 6 incluíram alguma restrição no modelo. Já com relação a eficácia da inspeção, apenas 7 artigos assumiram que as ações de inspeção são imperfeitas, enquanto 16 consideraram inspeções perfeitas.

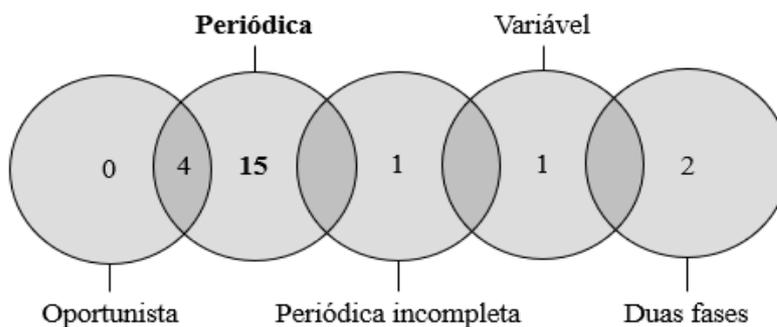
Figura 6 – Número de artigos por consideração de restrição e tipo de eficácia de inspeção assumida



Fonte: O autor (2019)

A Figura 7 indica a quantidade de artigos que assumiram em seus modelos as inspeções oportunista, periódica, periódica incompleta, variável ou de duas fases. Como pode ser visto, 15 dos 23 artigos, assumiram que as inspeções ocorrem apenas periodicamente; 1 ocorre em períodos incompletos; 1 em intervalos variados; e 2 consideraram que as inspeções ocorrem em intervalos de duas fases. Embora nenhum dos artigos tenha assumido apenas a inspeção oportunista, 4 dos artigos consideraram que as inspeções podem ser periódicas e oportunistas.

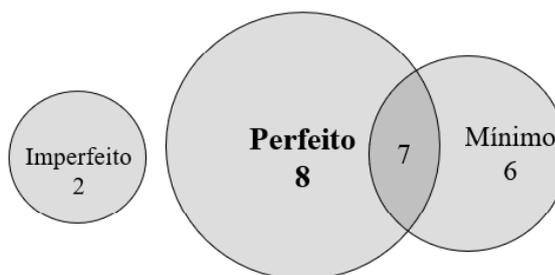
Figura 7 – Frequência de inspeção adotada nos artigos revisados



Fonte: O autor (2019)

A Figura 8 apresenta o número de artigos que consideraram restaurações imperfeita, perfeita ou mínima. Apenas 2 dos artigos assumiram que o grau de restauração do sistema após a detecção de uma falha oculta é imperfeito; enquanto 6 consideraram um grau de restauração mínimo; e 8 um grau de restauração perfeito. Além disso, 7 artigos assumiram que o grau de restauração pode ser perfeito ou mínimo.

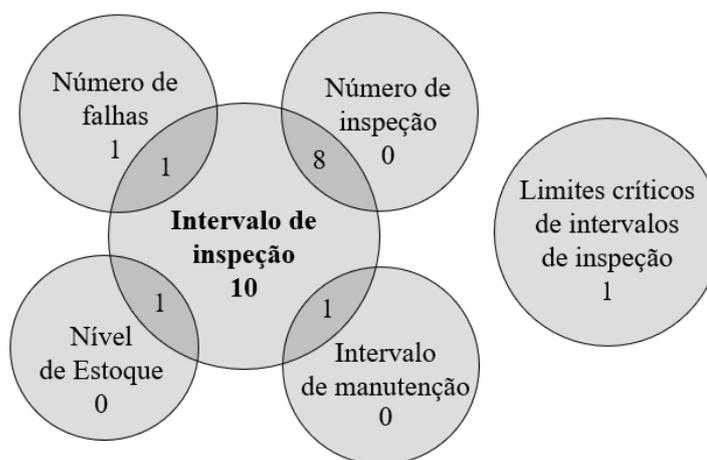
Figura 8 – Grau de restauração assumido após detecção da falha



Fonte: O autor (2019)

Na Figura 9 são apresentadas as variáveis de decisão identificadas na revisão e o número de artigos que consideraram em seus modelos uma ou mais destas variáveis. Em suma, 10 artigos consideraram apenas o intervalo de inspeção como a variável de decisão do problema; 1 artigo considerou apenas o número de falhas; e 1 assumiu os limites críticos dos intervalos de inspeção. Outros artigos consideraram, além do intervalo de inspeção, mais uma variável, como o número de inspeção (8 artigos), número de falhas (1 artigo), nível de estoque (1 artigo) e intervalo de manutenção (1 artigo).

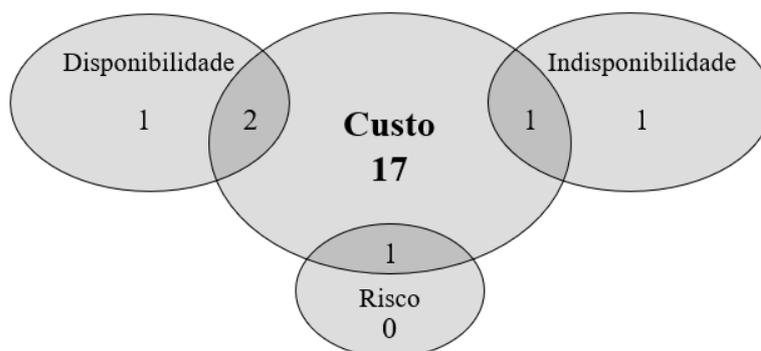
Figura 9 – Variáveis de decisão assumidas



Fonte: O autor (2019)

A Figura 10 apresenta os critérios de decisão identificados (disponibilidade, custo, indisponibilidade e risco) e o número de artigos que assumiram um ou mais destes critérios na modelagem do problema. Enquanto alguns artigos consideraram mais de um critério para tomada de decisão, outros assumiram apenas um. Dos 23 artigos, 17 consideraram apenas o custo; 1 considerou apenas a disponibilidade; e 1 apenas a indisponibilidade. Por outro lado, 2 dos artigos consideraram tanto custo quanto disponibilidade; 1 considerou custo e indisponibilidade; e 1 assumiu o custo e o risco como critérios de decisão.

Figura 10 – Critérios de decisão considerados



Fonte: O autor (2019)

Com isso, verificou-se que, dentre os artigos avaliados nesta primeira parte da revisão, a maioria considerou que as ações de inspeção são perfeitas (69,6% dos artigos), ocorrem periodicamente em intervalos de tempo fixos (65,2% dos artigos) e o sistema é perfeitamente restaurado após a detecção de uma falha oculta, voltando a condição de novo (34,8% dos artigos). Além disso, notou-se que 73,9% dos artigos levaram em consideração apenas o custo como critério de decisão e não incluíram restrições à modelagem do problema.

3.2 Políticas de manutenção imperfeita para sistemas sujeitos a degradação

De acordo com Wang e Pham (2006), manutenções ou reparos perfeitos podem não representar de fato o que ocorre na realidade. Uma suposição mais realística é que, após a manutenção, o sistema é encontrado em um estado entre *AGAN* e *ABAO*, ou seja, a manutenção é imperfeita. Com isso, a degradação sofrida por um sistema é reduzida em um certo grau, porém não totalmente. A proporção dessa redução pode ser representada de diversas formas, como mostrado em Wang e Pham (2006), sendo uma delas por um “fator de melhoria”, foco principal desta seção.

Segundo Wang e Pham (2006), Malik (1979) foi o responsável por introduzir o conceito de fator de melhoria no problema de planejamento da manutenção, que indica o grau de melhoria resultante na degradação de um sistema após uma ação de manutenção, sendo usado por diversos autores para descrever a eficácia da manutenção e as reduções obtidas na degradação, idade ou na taxa de falha do sistema.

Malik (1979) propôs, então, modelos de confiabilidade para um sistema de produção, que funciona de forma intermitente, visando definir intervalos de manutenções preventivas sequenciais para maximizar a confiabilidade do sistema, levando em consideração restrições sobre a taxa de falha do sistema e ações de manutenção com fator de melhoria constante.

Lie e Chun (1986) forneceram um algoritmo destinado às políticas de manutenção imperfeita e de substituição para manter a confiabilidade mínima de um sistema, considerando um fator de melhoria que aumenta à medida em que o sistema vai envelhecendo, fazendo com que as ações de manutenção imperfeita tendam a ações de substituição. O objetivo da proposta é encontrar o número ideal de manutenções antes do sistema ser substituído para minimizar custos e atender a restrição de confiabilidade mínima aceitável.

Nakagawa (1988) propôs dois modelos para políticas de manutenção imperfeita sequencial, considerando, em um deles, um fator de melhoria contínua sob a idade e a taxa de risco do sistema, o que proporciona reduções em maior proporção na idade do sistema a medida em que novas manutenções são realizadas.

Jayabalan e Chaudhuri (1992b) apresentaram um algoritmo de ramificação com regras de dominância para determinar o número de manutenções até a substituição de um sistema, assumindo intervalos de manutenção decrescente e um fator de melhoria constante sob as ações de manutenção. Semelhantemente, Jayabalan e Chaudhuri (1992a) e Jayabalan Chaudhuri (1992c) propuseram políticas de manutenção imperfeita sob um fator de melhoria constante para sistemas sujeitos a degradação.

Martorell; Munoz e Serradell (1996) apresentaram alguns modelos dependentes da idade para determinar os riscos e os custos associados as ações de inspeção e manutenção de componentes, considerando que a eficácia da manutenção melhora ao longo do tempo.

Bem-Daya e Rahim (2000) desenvolveram um modelo para a otimização conjunta do nível de manutenção e do *design* econômico do gráfico de controle- \bar{x} para um sistema sujeito a envelhecimento, considerando o efeito positivo da manutenção imperfeita sob um fator de melhoria dependente do custo de tal ação.

Lin; Zuo e Yam (2000) apresentaram modelos de manutenção imperfeita sequencial, assumindo fatores de ajuste e ações de manutenção sob melhoria contínua na redução da taxa de risco e na idade efetiva do sistema.

Liao; Pan e Xi (2010) desenvolveram um modelo de manutenção preventiva sequencial, baseado em confiabilidade, para um sistema sujeito a degradação ao longo do tempo, assumindo ações de manutenção sob um fator de melhoria, como em Lie e Chun (1986).

Ponchet; Fouladirad e Grall (2010) propuseram uma adaptação no modelo de idade virtual ARA_1 para tratar de um sistema sujeito a degradação gradual, considerando ações de manutenção sob um fator de melhoria dependente da data da ação e do nível de degradação sofrido pelo sistema desde a última manutenção.

Khatab; Ait-Kadi e Rezg (2014) desenvolveram um modelo matemático para definir a política ótima de manutenção de um sistema monitorado continuamente e sujeito a degradação estocástica, assumindo ações de manutenção corretiva e preventiva sob um fator de melhoria contínua.

Do *et al.* (2015) propuseram uma política de manutenção baseada na condição de um sistema em deterioração (CBM), considerando ações de manutenção perfeita e imperfeita sob um fator de melhoria depende do custo da ação.

Zhou *et al.* (2016) apresentaram um modelo de manutenção preventiva para equipamentos alugados, sujeitos a degradação, levando em consideração o efeito de manutenções imperfeitas sob um fator de melhoria dependente do custo da manutenção.

Khatab; Diallo e Sidibe (2017) desenvolveram um modelo matemático para determinar a idade ótima de aquisição, nível de atualização e estratégia de manutenção preventiva para um sistema de segunda mão, sujeito a degradação, considerando ações de manutenção sob um fator de melhoria contínua.

Chen *et al.* (2018) apresentaram uma política de manutenção imperfeita para sistemas sujeitos a degradação, levando em consideração ações de manutenção sob um fator de melhoria aleatória, além dos efeitos positivo e negativo das ações de manutenção sob a degradação do sistema.

Hu *et al.* (2018) propuseram um modelo de degradação e um método de estimativa de RUL (*Remaining Useful Life*) para sistemas sujeitos a degradação, considerando o efeito da manutenção imperfeita sob um fator de melhoria que segue uma distribuição normal.

Li; Chen e Pan (2018) desenvolveram um modelo integrado para otimizar os parâmetros do gráfico de controle CUSUM e a política de manutenção preventiva de sistemas sujeitos a degradação, assumindo as ações de manutenção sob um fator de melhoria contínua.

Zhao; He e Xie (2018) propuseram um *framework* de otimização de custos de garantia para sistemas sujeitos a degradação contínua, assumindo uma política de manutenção com ações sob um fator de melhoria aleatória.

Khatab (2018) revisitaram os resultados apresentados por Liao; Pan e Xi (2010), apontando uma nova abordagem para o modelo de otimização discutido, comparando os resultados de ambos e justificando as melhorias propostas.

Muitos trabalhos também são encontrados na literatura com o foco voltado para o estudo dos efeitos de diferentes ações sobre a degradação de sistemas e componentes que operam em modo *standby* e que, portanto, estão sujeitos a falha oculta.

Martorell; Sanchez e Serradell (1999) propuseram um modelo de confiabilidade dependente da idade para componentes de segurança de usinas nucleares, assumindo, para a condição dos componentes, os efeitos de inspeções, condições operacionais e ambientais, bem como manutenções imperfeitas sob eficácia constante.

Sanchez *et al.* (2009) apresentaram uma proposta para otimização das políticas de inspeção e manutenção de sistemas *standby* em usinas nucleares, baseando-se em dois critérios de decisão (indisponibilidade e custo) e considerando os efeitos das inspeções e manutenções imperfeitas sobre a degradação do sistema, além de incerteza epistêmica associada à modelagem da manutenção, que faz suas ações apresentarem uma eficácia aleatória.

Wang e Pham (2011) apresentaram um estudo voltado a otimização de manutenção para um sistema sujeito a falha oculta e a degradação devido desgaste e choques aleatórios, assumindo ações de manutenção imperfeita com fator de melhoria contínua.

Liu *et al.* (2016) desenvolveram um modelo para sistemas de segurança, sujeitos a degradação natural e choques externos, levando em consideração os efeitos de envelhecimento, variações do ambiente operacional e ações de manutenção imperfeita sob o estado do sistema, com a eficácia das manutenções sob a ideia de Wang e Pham (2011).

Kančev; Čepin e Gjorgiev (2014) propuseram uma ferramenta de avaliação probabilística de segurança para análise de risco de equipamentos de segurança, considerando efeitos de inspeções, envelhecimento, manutenções corretivas e preventivas e renovação sobre a indisponibilidade do equipamento, com um fator de melhoria constante para as ações de manutenção preventiva.

Martón; Sánchez e Martorell (2015) apresentaram uma abordagem para a avaliação de segurança probabilística de envelhecimento (APSA), visando apoiar decisões a respeito da eficácia dos programas de gestão de manutenção e requisitos de especificação técnica de

componentes críticos de usinas nucleares (NPP), levando em consideração os efeitos de inspeções, envelhecimento e manutenção sob eficácia constante.

Martón *et al.* (2016) sugeriram uma abordagem diferente para a modelagem RAM (*Reliability, Availability and Maintainability*), de sistemas de segurança, considerando efeitos de envelhecimento e de ações de inspeção e manutenção imperfeita sob eficácia constante.

Kančev *et al.* (2016) propuseram um modelo para avaliar a indisponibilidade de equipamentos de segurança, considerando os efeitos de envelhecimento, manutenções preventivas, manutenções corretivas, testes e renovação para sua condição operacional, com as ações de manutenção sob um fator de melhoria constante.

Martorell *et al.*, (2017a) apresentaram um modelo de indisponibilidade para componentes de segurança, abordando explicitamente os efeitos do estresse induzido pela demanda do componente, a eficácia da manutenção e a eficiência do teste durante as ações de inspeção, assumindo uma eficácia constante para as ações de manutenção.

Martorell *et al.* (2017b) propuseram uma abordagem para estimar parâmetros de um modelo de confiabilidade através de estimação por máxima verossimilhança. O estudo foi destinado a componentes de segurança, levando em consideração os efeitos de inspeções e manutenções preventivas e corretivas, com eficácia constante.

Martorell *et al.* (2018) apresentaram um modelo de indisponibilidade dependente do tempo para um componente de segurança, levando em consideração a contribuição da não confiabilidade para os modos de falha associado a função *standby* e ao estresse induzido pela demanda do sistema, além de assumir ações de manutenção com uma eficácia constante.

Um resumo sobre os artigos revisados nesta seção é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo da literatura de políticas de manutenção imperfeita em sistemas sujeitos a degradação

Artigo	Ano	Sistema/ componente sujeito a falha oculta	Efeitos sobre a degradação do sistema/componente			Fator de Melhoria da MP Imperfeita	Objetivo	Restrição	Variável de Decisão
			Teste/ Inspeção	MP Imperfeita	MC Imperfeita				
Malik	1979	Não		X		Constante	Confiabilidade	-	Intervalo de manutenção
Lie e Chun	1986	Não		X		Melhora a cada ação	Custo	Confiabilidade	Número de manutenções
Nakagawa	1988	Não		X		Melhora a cada ação	Custo	-	Intervalo de manutenção
Jayabalan e Chaudhuri	1992a	Não		X		Constante	Custo	Confiabilidade	Número de manutenções
Jayabalan e Chaudhuri	1992b	Não		X		Constante	Custo	Confiabilidade	Número de manutenções
Jayabalan e Chaudhuri	1992c	Não		X		Constante	Custo	Confiabilidade	Número de manutenções
Martorell; Munoz e Serradell	1996	Não		X		Melhora a cada ação	Custo e Risco	-	Número de manutenções
Martorell; Sanchez e Serradell	1999	Sim		X	X	Constante	Confiabilidade	-	Intervalo de manutenção
Ben-Daya e Rahim	2000	Não		X		Variável (dependente do custo)	Custo	-	Número de Intervalos de inspeção, tamanho da amostra, comprimento do i -éssimo intervalo de inspeção e coeficiente de limite do gráfico de controle
Lin; Zuo e Yam	2000	Não		X		Melhora a cada ação	Custo	-	Intervalo de manutenção

Artigo	Ano	Sistema/ componente sujeito a falha oculta	Efeitos sobre a degradação do sistema/componente			Fator de Melhoria da MP Imperfeita	Objetivo	Restrição	Variável de Decisão
			Teste/ Inspeção	MP Imperfeita	MC Imperfeita				
Sanchez <i>et al.</i>	2009	Sim	X	X		Variável aleatória	Custo e Indisponibilidade	-	Intervalos de inspeção e manutenção
Liao; Pan e Xi	2010	Não		X		Constante	Custo	Confiabilidade	Nível de confiabilidade e número de manutenções
Ponchet; Fouladirad e Grall	2010	Não		X		Variável dependente da degradação	Custo	-	Intervalo e número de manutenções
Wang e Pham	2011	Sim		X		Melhora a cada ação	Custo e Disponibilidade	-	Intervalo e número de manutenções
Kančev; Čepin e Gjorgiev	2014	Sim	X	X	X	Constante	Custo, Risco e Atividade operacional	-	Intervalo de inspeção e manutenção
Khatab; Ait-Kadi e Rezg	2014	Não		X	X	Melhora a cada ação	Disponibilidade	-	Nível de confiabilidade e número de manutenções
Martón; Sánchez e Martorell	2015	Sim	X	X		Constante	Deterioração	-	Intervalo de inspeção e manutenção
Do <i>et al.</i>	2015	Não		X		Variável dependente do custo	Custo	-	Limiar de manutenções preventiva e imperfeita e probabilidade de falha no intervalo de inspeção
Martón <i>et al.</i>	2016	Sim	X	X		Constante	Custo e Indisponibilidade	-	Intervalo de inspeção e manutenção
Kančev <i>et al.</i>	2016	Sim	X	X	X	Constante	Indisponibilidade	-	Intervalo de inspeção
Zhou <i>et al.</i>	2016	Não		X		Variável dependente do custo	Custo	-	Intervalo de manutenção

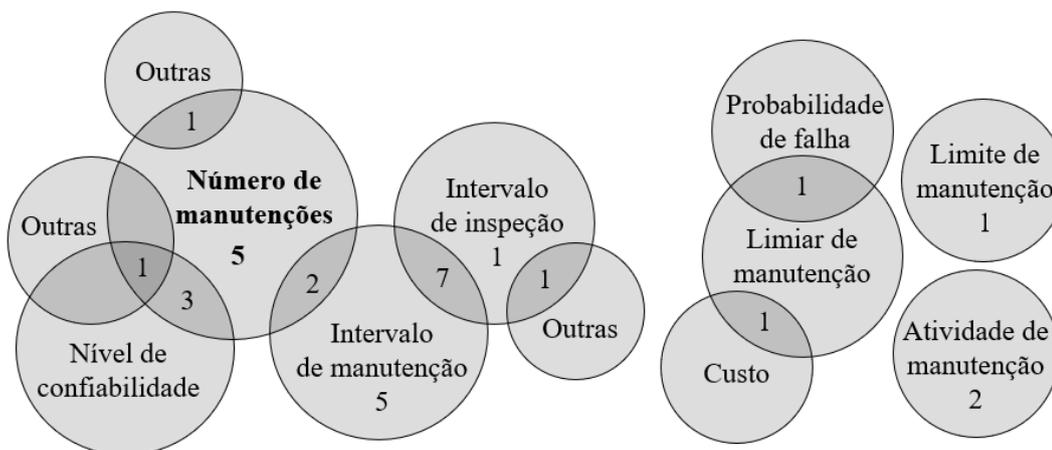
Artigo	Ano	Sistema/ componente sujeito a falha oculta	Efeitos sobre a degradação do sistema/componente			Fator de Melhoria da MP Imperfeita	Objetivo	Restrição	Variável de Decisão	
			Teste/ Inspeção	MP Imperfeita	MC Imperfeita					Condição Operacional
Liu <i>et al.</i>	2016	Sim		X		X	Melhora a cada ação	Custo	-	Limite de manutenção
Martorell <i>et al.</i>	2017a	Sim	X	X			Constante	Indisponibilidade	-	Intervalo de inspeção e manutenção
Martorell <i>et al.</i>	2017b	Sim	X	X			Constante	Indisponibilidade	-	Intervalo de inspeção e manutenção
Khatab; Diallo e Sidibe	2017	Não		X			Melhora a cada ação	Custo	-	Idade inicial, nível de atualização, nível de confiabilidade e número de manutenções
Khatab	2018	Não		X			Melhora a cada ação	Custo	Confiabilidade	Nível de confiabilidade e número de manutenções
Martorell <i>et al.</i>	2018	Sim	X	X			Constante	Indisponibilidade	-	Intervalo de inspeção e manutenção
Chen <i>et al.</i>	2018	Não		X		X	Variável aleatória	Disponibilidade	-	Custo e limiar da manutenção
Hu <i>et al.</i>	2018	Não		X			Segue uma distribuição Normal	Degradação	-	Atividades de manutenções
Li; Chen e Pan	2018	Não		X			Constante	Custo	-	Idade da máquina, número de manutenções, tamanho da amostra, intervalos de amostragem e coeficientes do intervalo de decisão e gráfico de controle
Zhao; He e Xie	2018	Não		X			Variável aleatória	Custo	-	Atividades de reparo

Fonte: O autor (2019)

3.2.1 Visão geral dos modelos

Na Figura 11 é apresentado o número de artigos que assumiu alguma das variáveis de decisão identificadas nos 31 trabalhos revisados nesta seção (3.2). Alguns artigos assumiram apenas uma variável de decisão, enquanto outros consideraram duas ou mais variáveis. Como mostra a Figura 11, dentre os artigos que consideraram apenas uma variável, 5 são referentes ao número de manutenções; 5 ao intervalo de manutenção; 2 a atividade de manutenção; 1 ao intervalo de inspeção; e 1 ao limite de manutenção. Com relação aos artigos que assumiram duas ou mais variáveis de decisão, verificou-se que 7 consideraram tanto o intervalo de inspeção quanto de manutenção; 3 consideraram o número de manutenções e o nível de confiabilidade; 2 assumiram o número e o intervalo de manutenções; 1 considerou outras variáveis, além do número de manutenções e nível de confiabilidade; 1 assumiu o número de manutenções e outras variáveis; 1 levou em consideração o intervalo de inspeção e outras variáveis; 1 assumiu limiar de manutenção e probabilidade de falha; e 1 considerou limiar de manutenção e custo.

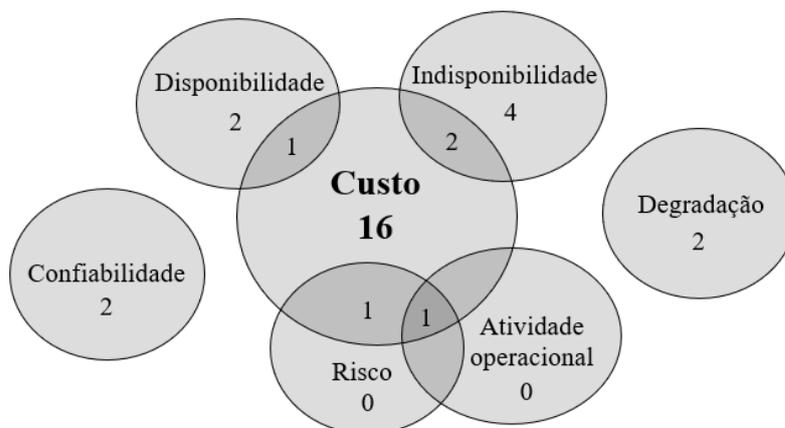
Figura 11 – Variáveis de decisão assumidas



Fonte: O autor (2019)

A Figura 12 apresenta o número de artigos que considerou um ou mais dos critérios de decisão identificados. Dentre os 31 artigos, 16 consideraram apenas o custo; 4 a indisponibilidade; 2 a disponibilidade; 2 a confiabilidade e 2 a degradação. Entre os artigos que assumiram dois ou mais critérios, 2 correspondem a custo e indisponibilidade; 1 a custo e disponibilidade; 1 a custo e risco; e 1 a custo, risco e atividade operacional.

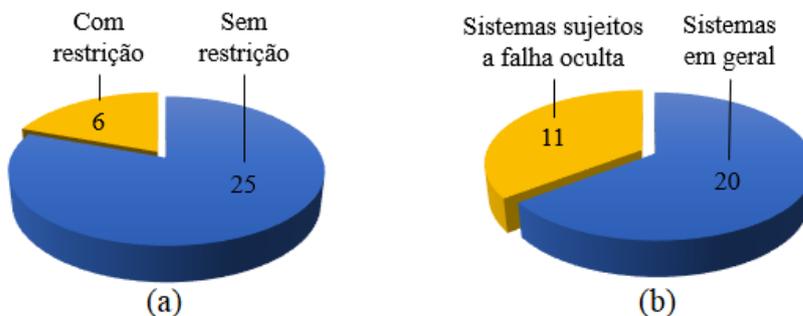
Figura 12 – Critérios de decisão considerados



Fonte: O autor (2019)

A Figura 13 apresenta o número de artigos que considerou algum tipo de restrição na modelagem no problema (gráfico (a)), assim como o número dos que focaram em sistemas sujeitos a falha oculta (gráfico (b)). Como pode ser visto, dos 31 artigos revisados, apenas 6 consideraram alguma restrição em seus modelos e 11 dedicaram o estudo para sistemas sujeitos a falha oculta.

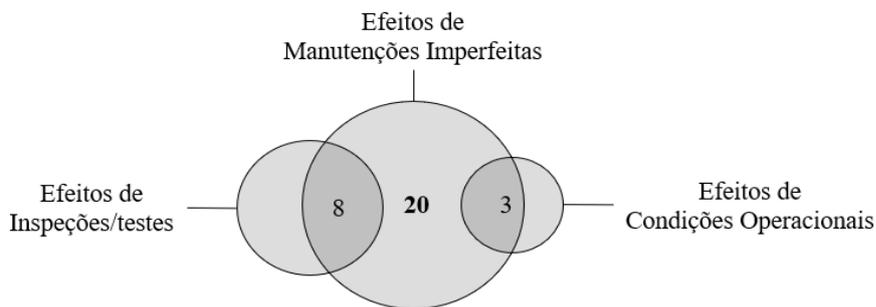
Figura 13 - Número de artigos por consideração de restrição e tipo de sistema



Fonte: O autor (2019)

A Figura 14 indica o número de artigos que considerou efeitos de inspeção/teste, manutenção imperfeita e/ou condições operacionais na modelagem do problema. Todos os artigos assumiram os efeitos da manutenção imperfeita, dos quais 8 consideraram também os efeitos das ações de inspeção/teste e 3 os efeitos das condições operacionais do sistema.

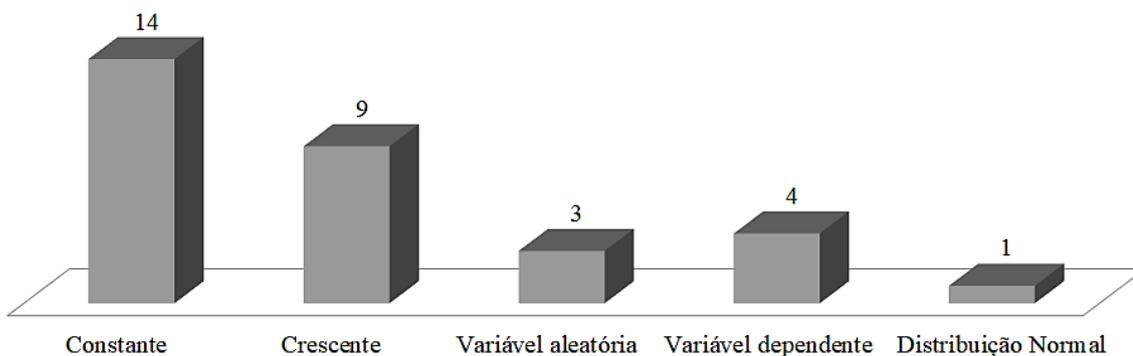
Figura 14 – Efeitos considerados pelos artigos sob a degradação do sistema



Fonte: O autor (2019)

Por fim, a Figura 15 mostra o número de artigos que considerou cada fator de melhoria apresentado. Identificou-se que, dos 31 artigos revisados, 14 assumiram um fator de melhoria constante ao longo das ações de manutenção; 9 levaram em consideração um fator de melhoria crescente; 3 consideraram um fator de melhoria aleatório; 4 assumiram um fator de melhoria dependente; e 1 considerou um fator de melhoria com distribuição normal.

Figura 15 – Número de artigos por fator de melhoria considerado na ação de manutenção imperfeita



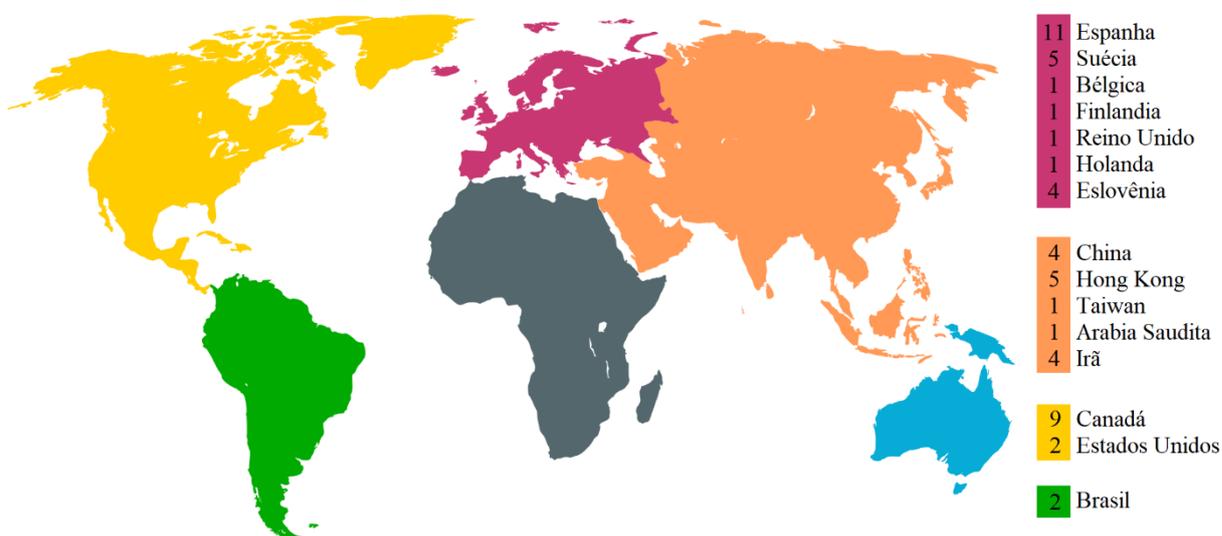
Fonte: O autor (2019)

Verificou-se, portanto, que a maioria dos trabalhos considerou o intervalo de manutenção como uma das variáveis de decisão do problema (45,2% dos artigos) e apenas o custo como critério de decisão (51,6%). Além disso, a maioria dos artigos não assumiu restrições na modelagem do problema (80,6%) e apenas 35,5% dos trabalhos tem o foco voltado a sistemas sujeitos a falha oculta. Com relação aos efeitos sob a degradação do sistema, a maioria dos artigos considerou apenas os efeitos da manutenção imperfeita (64,5%) e a respeito do grau de melhoria obtido sob a degradação do sistema após uma ação de manutenção, a maioria dos trabalhos consideraram um fator de melhoria constante (45,2%).

3.3 Discussão da literatura

Com esta revisão, foi possível perceber que o estudo das falhas ocultas está presente em diversas partes do mundo, com pesquisadores empenhados em propor políticas para detecção e correção dessas falhas. Isso fortalece a ideia de haver uma preocupação global sobre o tema, mostrando-se relevante o desenvolvimento de novas pesquisas nesta área. Dentre os 54 artigos analisados, foram identificados 52 pesquisadores com trabalhos envolvendo sistemas sujeitos a falha oculta, dos quais, 24 estão distribuídos pela Europa; 13 concentram-se na Ásia; 11 na América do Norte; e 2 na América do Sul, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Número de pesquisadores pelo mundo com trabalhos envolvendo sistemas com falha oculta



Fonte: O autor (2019)

Após a revisão de todos os artigos, dois pontos em especial chamaram mais atenção:

- 1) A maioria dos trabalhos sobre políticas de inspeção para sistemas sujeitos a falha oculta (seção 3.1) consideraram apenas um critério como base para tomada de decisão. No entanto, como já discutido no capítulo anterior, um acidente pode surgir a partir de uma falha oculta e gerar múltiplas perdas, como financeira, humana, ambiental, operacional, etc., sendo fundamental, de acordo com de Almeida *et al.* (2015), definir a política de inspeção do sistema, levando em consideração mais de um critério de decisão.
- 2) A maioria dos trabalhos sobre políticas de manutenção imperfeita para sistemas sujeitos a degradação (seção 3.2) assumiram um fator de melhoria constante sob a degradação do sistema após a ação de manutenção, mantendo a mesma eficácia em todas as ações. Contudo, em uma das análises feitas recentemente por Li; Chen e

Pan (2018), os autores mostram que os gerentes obteriam melhores resultados focando sua atenção em melhorar a eficácia de cada manutenção, o que possibilitaria atingir maiores reduções na degradação do sistema ao longo do tempo. Além disso, Martón *et al.* (2016) sugeriram que novas pesquisas devem ser direcionadas para estimar ou até mesmo melhorar a eficácia das ações de manutenção.

Neste sentido, visando solucionar os pontos citados acima, dois modelos de decisão para sistemas sujeitos a falha oculta são propostos no capítulo seguinte.

4 MODELOS DE DECISÃO

Neste capítulo são apresentados dois modelos de decisão que visam auxiliar gestores de manutenção a definir as políticas ótimas de inspeção e manutenção para sistemas sujeitos a falha oculta. O Modelo 1 propõe a avaliação de componentes de segurança através da estimativa de sua indisponibilidade em uma abordagem que considera os efeitos de inspeções e manutenções sobre a condição do componente, com a eficácia das manutenções sob melhoria contínua. O Modelo 2 trata-se de uma abordagem multicritério que propõe a avaliação de sistemas de proteção sob Custo, Saúde e Segurança, Meio Ambiente e Recuperação Operacional, além de assumir a incerteza associada as informações de preferência do decisor.

4.1 Modelo 1: Modelo de indisponibilidade para componentes de segurança

De acordo com Martorell *et al.* (2017a), componentes do tipo *standby*, que só operam em casos de demanda, geralmente possuem dois tipos principais de modo de falha, que contribuem para a probabilidade de falha de demanda (PFD): (1) falha causada pela demanda e (2) falha relacionada ao modo de espera (*standby*). Esses modos de falha são frequentemente afetados pela degradação do componente, causada por estresse relacionado à sua demanda (modo de falha 1) e devido seu envelhecimento (modo de falha 2). Ou seja, a medida em que o componente vai envelhecendo e recebendo demandas, sua degradação tende a aumentar até o momento de sua falha. Desse modo, atividades de manutenção e inspeção são realizadas para controlar a degradação, a indisponibilidade e a probabilidade de falha (não-confiabilidade) do componente, embora isso tenha efeitos positivos e negativos (adversos).

Ações de manutenção e inspeção podem melhorar ou piorar o estado do componente, contribuindo para a diminuição (efeito positivo) ou aumento (efeito negativo) de sua probabilidade de falha. Na literatura, podemos encontrar trabalhos propondo bases bem estruturadas para explicar o envelhecimento de componentes *standby* e os efeitos positivos e negativos das ações de manutenção e inspeção. Enquanto alguns trabalhos abordam os efeitos de tais ações separadamente, Martorell *et al.* (2017a) propuseram um novo modelo que engloba a influência de ambas as ações sob a PFD do componente. Segundo os autores, estudos anteriores descobriram que a PFD deve ser considerada como uma função não só do número de inspeções, mas também da eficácia das atividades de manutenção.

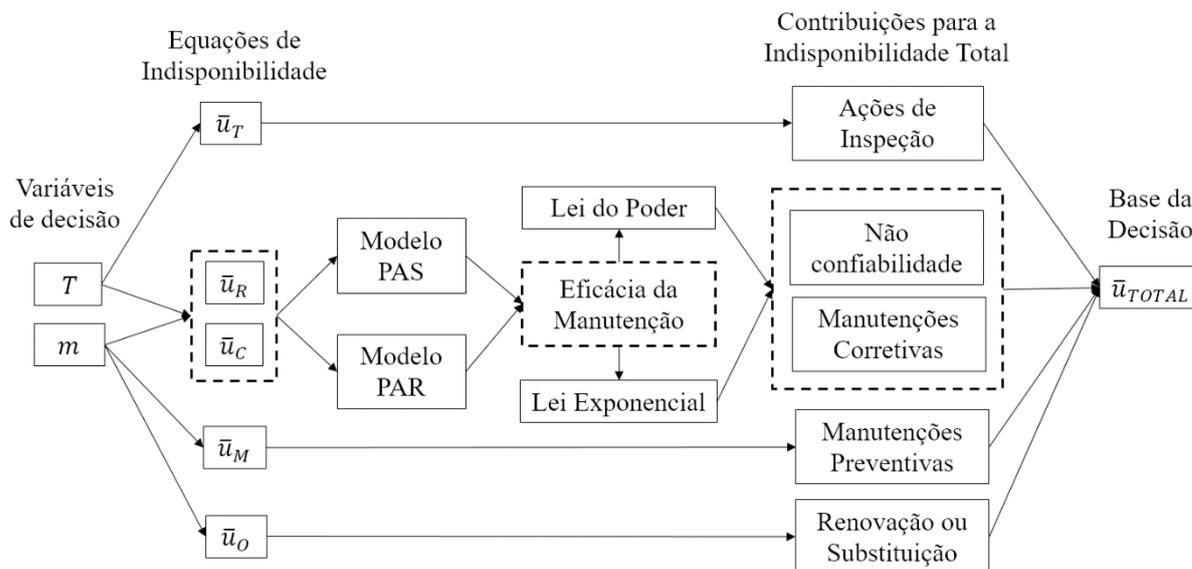
Neste contexto, Martorell *et al.* (2017a) focaram no modo de falha causado pela demanda (modo de falha 1) e propuseram um novo modelo para estimar a indisponibilidade total média de componentes de segurança até sua renovação ou substituição, abordando os efeitos do estresse induzido pela demanda, da eficácia da manutenção e da eficiência da inspeção. No entanto, o efeito positivo das ações de manutenção é abordado pelos autores sob uma eficácia de manutenção constante, que não expressa melhorias ao decorrer das ações. E de acordo com Zangwill e Kantor (1998), cada vez mais práticas de Melhoria Contínua (MC) vem sendo adotadas por diversas organizações em diferentes processos, com o objetivo de eliminar suas ineficiências e, com isso, obter melhorias ao longo do tempo. Zangwill e Kantor (1998) ainda completam que inúmeras empresas e organizações obtiveram ganhos substanciais em seus processos com a aplicação de técnicas de MC.

A MC fornece, talvez, o componente mais central e universal do TQM (*Total Quality Management*), que por si só ajudou muitas empresas a alcançarem alta qualidade e produtividade. No entanto, apesar da eficácia da MC, Zangwill e Kantor (1998) identificaram que, até o início de seus estudos, nenhuma teoria científica havia sido proposta para guiar a aplicação da MC ou para melhorar sistematicamente seus conceitos.

Zangwill e Kantor (1998) afirmam que no contexto industrial, a MC e a Curva de Aprendizado (CA), apesar de diferentes, apresentam características similares. Em uma análise de custos, por exemplo, a CA prevê a rapidez com que os custos futuros cairão à medida em que mais itens forem produzidos, mas não sugere como reduzir esses custos nem como reduzi-los mais rapidamente. A MC, por outro lado, identifica qual melhoria fazer e como realizá-la mais rápido e da melhor forma. Nesse sentido, a MC remove parte da obscuridade por trás da CA e pode ajudar o gerenciamento a melhorar a taxa de aprendizado da CA. Assim, a teoria desenvolvida para MC é então aplicável a CA.

Portanto, dado a importância de componentes de segurança na prevenção de consequências indesejadas, é fundamental estabelecer práticas de MC sob as ações de manutenção para que eventuais ineficiências sejam eliminadas e sua eficácia melhore a cada nova ação. Visando sanar tal problema, o Modelo 1 foi desenvolvido com base no estudo proposto por Martorell *et al.*, (2017a), para estimar a indisponibilidade de componentes de segurança sobre uma perspectiva diferente, em que práticas de MC são adotadas sobre as ações de manutenção e sua eficácia passa a ser uma função dependente do número de manutenções realizadas em um período de renovação. O Modelo 1 é apresentado logo a seguir, pela Figura 17.

Figura 17 – Modelo 1



Fonte: O autor (2019)

O problema de decisão consiste em definir o intervalo de inspeção, T , e o número de manutenções, m , a serem executadas durante o período de renovação ou substituição do componente, L , de modo a minimizar sua indisponibilidade total média neste período, \bar{u}_{TOTAL} .

Dessa forma, como mostrado na Figura 17, diferentes valores de T e m são analisados por meio das equações \bar{u}_T , \bar{u}_R , \bar{u}_C , \bar{u}_M e \bar{u}_O , que fornecerão a indisponibilidade média do componente em um período de renovação devido as ações de inspeção, não confiabilidade, manutenções corretivas, manutenções preventivas e renovação ou substituição, respectivamente. A soma dessas contribuições resultará, portanto, na indisponibilidade total média do componente em um período de renovação, \bar{u}_{TOTAL} , que servirá como base para que os responsáveis pela gestão da manutenção decidam quais valores de T e m deverão ser adotados para as políticas de inspeção e manutenção dos componentes de segurança.

Para as equações de indisponibilidade consideradas neste modelo são utilizadas as notações a seguir.

- T Intervalo de Inspeção
- M Intervalo de Manutenção
- L Período de renovação ou substituição
- m Número de manutenções em um ciclo de renovação
- ρ_m^+ Probabilidade de Falha de Demanda dependente do tempo imediatamente após a m -ésima manutenção

$\bar{\rho}$	Probabilidade de Falha de Demanda média de um ciclo de renovação
$\bar{\rho}_D$	Probabilidade de Falha de Demanda média de um ciclo de renovação associada a falhas detectadas por inspeção
$\bar{\rho}_U$	Probabilidade de Falha de Demanda média de um ciclo de renovação associada a falhas não detectadas por inspeção
$\rho(t)$	Probabilidade de Falha de Demanda dependente do tempo
ρ_0	Probabilidade de Falha de Demanda inicial
p_1	Fator de degradação devido estresse induzido por demanda
η	Eficiência da Inspeção
τ	<i>Downtime</i> por ação de inspeção
σ	<i>Downtime</i> por ação de manutenção preventiva
μ	<i>Downtime</i> por ação de manutenção corretiva
θ	<i>Downtime</i> por ação de renovação ou substituição
ε_1	Eficácia da primeira manutenção
ε_{m-1}	Eficácia da manutenção anterior
ε_m	Eficácia da m -ésima manutenção sob melhoria contínua
ε^*	Eficácia de manutenção ótima
φ	Taxa de melhoria por ação de manutenção
\bar{u}_T	Indisponibilidade média por ciclo de renovação devido ações de inspeção
\bar{u}_M	Indisponibilidade média por ciclo de renovação devido ações de manutenção preventiva
\bar{u}_R	Indisponibilidade média por ciclo de renovação devido a não-confiabilidade
\bar{u}_C	Indisponibilidade média por ciclo de renovação devido ações de manutenção corretiva
\bar{u}_O	Indisponibilidade média por ciclo de renovação devido ação de renovação ou substituição
\bar{u}_{TOTAL}	Indisponibilidade total média em um período de renovação ou substituição
\bar{u}_{TOTAL}^{max}	Restrição de indisponibilidade total média máxima de um período de renovação ou substituição
D_{req}	Disponibilidade requerida

Para o desenvolvimento das equações, os seguintes pressupostos foram considerados:

1. T e m são as variáveis de decisão e representam respectivamente o intervalo de inspeção e o número de manutenções em um período de renovação ou substituição;
2. A variável m deve apresentar valores inteiros e maiores ou igual a 1;
3. O período de renovação, L , é fixo;
4. As ações de manutenção são imperfeitas;

5. Em cada ação de inspeção o componente é submetido a testes para identificar seu estado de funcionamento. Caso o componente esteja em estado não funcional, um reparo mínimo é imediatamente realizado;
6. A cada demanda o componente sofre uma degradação p_1 ;
7. A primeira manutenção ocorre após M horas, com uma eficácia inicial constante ε_1 ;
8. A cada nova ação de manutenção sua eficácia é melhorada a uma taxa φ ;
9. A última manutenção deverá ocorrer após mM horas, com uma eficácia ε_m ;
10. A renovação ou substituição do componente ocorrerá após L horas, ou seja, após $mM + M$ horas, retornando o componente a seu estado inicial de tão bom quanto novo.

4.1.1 Indisponibilidade de componentes *standby* em um período de renovação L .

Durante um período de renovação, L , a indisponibilidade de componentes em *standby* é afetada por dois tipos de efeito:

- a) Efeito de não confiabilidade, que gera indisponibilidade do componente devido à ocorrência de falhas;
- b) Efeito *downtime*, que gera indisponibilidade do componente devido aos tempos gastos com as ações de inspeção, manutenção e renovação ou substituição.

4.1.1.1 Efeito de não confiabilidade

De acordo com Martorell *et al.* (2017a), a indisponibilidade média do componente em um período de renovação devido ao efeito de não confiabilidade, \bar{u}_R , é uma função da Probabilidade de Falha de Demanda (PFD) do componente. Assim, temos que

$$\bar{u}_R = \bar{\rho} \quad (4.1)$$

Onde $\bar{\rho}$ é a PFD média do componente durante o período de renovação L .

A PFD de componentes do tipo *standby* depende do número de vezes em que este componente é demandado. Essas demandas são classificadas de duas formas:

- a) Demanda planejada, referente a realização de testes durante inspeções;
- b) Demanda não planejada, relativa a demanda real do componente e a testes executados logo após a reparação de uma falha.

Segundo Martorell *et al.* (2017a), apesar das ações de inspeção não serem as únicas contribuintes para o estresse sofrido pelo componente devido sua demanda, quando lidamos com os componentes mais importantes, a frequência das ações de inspeção é maior, logo o estresse induzido pela inspeção será, provavelmente, o maior contribuinte para o desgaste do

componente. Dessa forma, a PFD dependente do tempo pode ser expressa em termos da função de degradação dependente do tempo, $f(t)$, da seguinte maneira:

$$\rho(t) = \rho_0 + \rho_0 \cdot f(t) \quad (4.2)$$

Onde $f(t)$ pode ser formulado da seguinte forma:

$$f(t) = p_1 \cdot n(t) \quad (4.3)$$

Sendo p_1 o fator de degradação por ação de inspeção e $n(t)$ a função que representa o número total de demandas no componente devido ações de inspeção ocorridas até o instante t .

Com isso, quando apenas o estresse induzido pelas ações de inspeção é considerado, a PFD é representada pela Equação (4.2), enquanto na Equação (4.3) $n(t)$ é expressa por $n(t) = (t/T)$, sendo T o intervalo de inspeção e t o ponto no horizonte de tempo em que a PFD está sendo avaliada. Portanto, adicionando à PFD do componente o estresse induzido pela demanda devido ações de inspeção ao longo do tempo teremos:

$$\rho(t) = \rho_0 + \left(\rho_0 \cdot p_1 \cdot \frac{t}{T} \right) \quad (4.4)$$

A Equação (4.4), representa, então, o efeito negativo das ações de inspeção sob a degradação do componente.

A fim de introduzir o efeito positivo da manutenção preventiva sob a degradação do componente devido sua demanda, dois modelos de manutenção imperfeita são considerados no trabalho de Martorell *et al.* (2017a): Modelo PAR (*Proportional Age Reduction*) e o Modelo PAS (*Proportional Age Setback*).

Na abordagem PAS, é assumido que cada atividade de manutenção reduz, proporcionalmente, por um fator ε , a degradação do componente ao estado imediatamente antes de entrar na manutenção. Já na abordagem PAR, assume-se que cada ação de manutenção reduz, proporcionalmente, por um fator ε , apenas a degradação do componente obtida da manutenção anterior, enquanto o restante permanece inalterado. As Equações (4.5) e (4.6), propostas por Martorell *et al.* (2017a) para os modelos PAS e PAR, respectivamente, expressam a PFD de componentes *standby* que aborda tanto o efeito negativo das ações de inspeção, associado ao estresse induzido pela demanda do componente, quanto o efeito positivo das ações de manutenção imediatamente após a m -ésima manutenção.

$$\rho_m^+ = \rho_m(t = t_m) = \rho_0 + \rho_0 \cdot p_1 \cdot \frac{M}{T} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \{1 - (1 - \varepsilon)^m\} \quad \text{PAS} \quad (4.5)$$

$$\rho_m^+ = \rho_m(t = t_m) = \rho_0 + \rho_0 \cdot p_1 \cdot \frac{M}{T} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot m \quad \text{PAR} \quad (4.6)$$

Onde t_m é o tempo referente a ocorrência da m -ésima manutenção.

Em ambos os modelos, PAS e PAR, o fator ε representa a eficácia da manutenção, que varia em um intervalo de 0 à 1. Essa eficácia é apresentada por Martorell *et al.* (2017a) por um valor que se mantém constante para quaisquer quantidades de manutenção executadas durante o período de renovação do componente. No entanto, diante do contexto da MC sob as ações de manutenção, a eficácia da manutenção passa a ser tratada como uma função dependente do número de manutenções, ε_m , que melhora a cada nova ação de manutenção.

A contribuição proposta para este modelo consiste, portanto, no desenvolvimento de duas equações de melhoria contínua para representar o progresso da eficácia da manutenção. O desenvolvimento de tais equações é abordado a seguir.

4.1.1.1.1 Equações de Melhoria Contínua para Eficácia das Ações de Manutenção

Tendo em vista a importância de expressar o progresso da melhoria na realização de processos industriais em geral, Zangwill e Kantor (1998) desenvolveram uma equação diferencial de melhoria contínua para descrever quantitativamente a aprendizagem industrial. Essa equação foi gerada a partir de 5 postulados e introduz na literatura de CA e MC a abordagem de *Volterra-Lotka* de predadores e presas, onde as presas são os erros, desperdícios e outras ineficiências que prejudicam as operações do processo; e os predadores são gestores, que estão tentando erradicar as ineficiências para melhorar o processo.

A CIDE (*Continuous Improvement Differential Equation*), proposta por Zangwill e Kantor (1998), produz, como resultado, 3 tipos de curvas de aprendizagem para descrever comportamentos de melhoria: uma Lei do Poder; uma Lei Exponencial; e uma Forma Finita. De acordo com os autores, as leis do Poder e Exponencial são bem conhecidas para refletir o aprendizado e se mostraram igualmente eficazes em ajustar os dados de aprendizado e melhoria industrial em testes realizados a partir de 21 séries de dados, publicados na literatura de progresso de qualidade.

- a) **Lei do Poder:** Como Feller (1940) observou, a Lei do Poder é uma espécie de *catchall* (abarca tudo), porque fornece um bom ajuste para uma grande variedade de curvas. Quando uma Lei do Poder é observada, não podemos ignorar a possibilidade de que, na realidade, os dados são a soma de outras formas. Isso poderia explicar, em grande parte, o papel dominante da Lei do Poder na literatura da curva de aprendizado, na qual os dados de custo são somas de centenas ou milhares de séries de dados separados.
- b) **Lei Exponencial:** Do ponto de vista gerencial, Zangwill e Kantor (1998) explicam que a exponencial é uma escolha muito atraente, por ser sem memória. Já as outras

formas são mais complicadas, porque requerem especificação de um ponto de partida, um desvio ou um ponto final da variável tratada. A aplicação da exponencial se mostra interessante nos casos em que o objetivo consiste apenas em articular a meta de alcançar uma determinada porcentagem de melhoria no processo em questão.

Essas CAs são expressas para representar uma métrica geral, que pode ser qualidade, eficácia, custo, lucro, etc. Neste sentido, foi definida, como métrica para o Modelo 1, a eficácia das ações de manutenção e adaptou-se os resultados gerados pela CIDE, de Zangwill e Kantor (1998), para expressar a melhoria da eficácia da manutenção em cada ação realizada nos componentes.

Neste trabalho, assume-se que ao adotar práticas de melhoria continua sob as ações de manutenção, a eficácia de tais ações melhora a cada execução. Desse modo, a eficácia da m -ésima manutenção, ε_m , será o valor de sua eficácia anterior, ε_{m-1} , mais a proporção de melhoria obtida a partir da eliminação de ineficiências existentes no processo de manutenção. Especificamente, isso pode ser expresso pelas Equações (4.7) e (4.8).

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{m-1} + [(\varepsilon^* - \varepsilon_{m-1}) \cdot (1 - m^{-\varphi})] \quad \text{Lei do Poder} \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{m-1} + [(\varepsilon^* - \varepsilon_{m-1}) \cdot (1 - e^{-\varphi \cdot m})] \quad \text{Lei Exponencial} \quad (4.8)$$

Onde $m \geq 1$ e $\varepsilon^* \geq \varepsilon_{m-1}$.

As Equações (4.7) e (4.8) representam, matematicamente, o progresso da eficácia da manutenção a cada nova ação realizada e, portanto, dependem de informações a priori a respeito da eficácia da manutenção anterior, ε_{m-1} , para poder estimar o valor de ε_m . Contudo, para realização de análises prévias sobre o número de manutenções ideais a serem realizadas em um período de renovação, não seria possível utilizar tais equações, pois a informação sobre ε_{m-1} não seria conhecida. Desta forma, a fim de estimar ε_m para qualquer m a partir das constante já conhecidas (ε^* e φ), as Equações (4.7) e (4.8) foram generalizadas para as Equações (4.9) e (4.10), respectivamente.

$$\varepsilon_m = \varepsilon^* + (m!)^{-\varphi} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon^*) \quad \text{Lei do Poder} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon^* + (\varepsilon_1 - \varepsilon^*) e^{-\left(\frac{(m+1)^2 - m - 3}{2}\right)\varphi} \quad \text{Lei Exponencial} \quad (4.10)$$

Onde $m \geq 1$ e $\varepsilon^* \geq \varepsilon_1$.

I. Eficácia Ótima de Manutenção (ε^*)

A eficácia ótima de manutenção, ε^* , representa o nível de desempenho ideal que as ações de manutenção devem atingir. Portanto, em cada manutenção os gestores responsáveis devem buscar eliminar ineficiências presentes ao longo da ação, com o objetivo de melhorar continuamente a eficácia da manutenção até atingir seu nível de desempenho ótimo.

Assim como seu termo irmão "qualidade", o valor ótimo ε^* pode ser difícil de definir com precisão. Dessa forma, ε^* pode ser estimado pelos gestores de manutenção por extrapolação ou de outras maneiras (ZANGWILL, 1993), tais como:

- a) *Por Referência*: Os gestores de manutenção podem estudar o desempenho das ações de manutenção ou de processos semelhantes nas melhores empresas do mundo e, com isso, definir a meta, ε^* , para que as ações sejam executadas da melhor maneira possível.
- b) *Por Direito Tecnológico*: Ações de manutenção podem ser avaliadas por engenheiros para determinar seu desempenho, onde é verificado se o sistema está operando de maneira ótima, sem desperdícios, defeitos ou problemas de qualquer tipo. Sob tais circunstâncias, os gestores de manutenção assumem, então, esse nível de desempenho como a meta a ser atingida, ε^* .

II. Melhoria da Eficácia da Manutenção

A melhoria da eficácia da manutenção é inversamente proporcional aos fatores/ações Sem Valor Agregado (SVA), presentes no processo de manutenção, de modo que a eficácia da manutenção aumenta à medida em que fatores/ações SVA são eliminados.

Se ε^* é o nível de desempenho ótimo da manutenção e ε_{m-1} é o nível de desempenho da penúltima manutenção realizada, então $\varepsilon^* - \varepsilon_{m-1}$ representa a quantidade de eficácia que resta a ser obtida antes que as ações de manutenção passem a ocorrer de maneira ótima. Essa quantidade pode ser interpretada como o volume de fatores/ações SVA existente na manutenção que precisa ser eliminado para que a manutenção obtenha seu desempenho ideal. Então, temos que o volume de fatores/ações SVA presente na penúltima ação de manutenção ($m - 1$) é igual a diferença entre os níveis de eficácia ótimo e atual, como mostra a Equação (4.11).

$$SVA_{m-1} = \varepsilon^* - \varepsilon_{m-1} \quad (4.11)$$

Portanto, a redução de SVA equivale ao ganho de melhoria na eficácia da manutenção. Neste trabalho, a definição de fatores/ações SVA inclui manutenções preventivas desnecessárias e conservadoras; procedimentos de manutenção não padronizados; mão de obra não especializada, utilização de insumos OEM (*Original Equipment Manufacturer*) sem

verificar sua procedência e qualquer outro fator/ação que não contribua para o bom funcionamento do sistema após sua manutenção. Assim, se $\varepsilon^* - \varepsilon_{m-1}$ é grande, há muitas oportunidades para melhorar as ações de manutenção, logo a taxa de melhora deve ser grande (ou seja, é necessário eliminar muitas ineficiências). Por outro lado, se $\varepsilon^* - \varepsilon_{m-1}$ é pequeno, há poucas oportunidades e a taxa de melhoria deve ser pequena, pois poucas ineficiências precisam ser eliminadas.

III. Alcançando o nível de desempenho ótimo

O nível de desempenho ótimo é obtido quando a gestão da manutenção assume práticas que visam melhorar continuamente o processo de realização das manutenções. Para isto, é necessário detectar e eliminar todas as ineficiências do processo. Como alternativa para alcançar o nível de desempenho ótimo da manutenção, sugere-se a adesão de algumas práticas contidas na estrutura do WCM, como:

- Atividades Autônomas;
- Manutenção Profissional;
- Desenvolvimento de Pessoas;

Além de somar a tais práticas a utilização das ferramentas citadas na Tabela 3.

Assumindo, agora, que as ações de manutenções melhoram continuamente a medida em que novas ações são realizadas, as Equações (4.5) e (4.6) passam a ser representadas, neste trabalho, pelas Equações (4.12) e (4.13), respectivamente.

$$\rho_m^+ = \rho_m(t = t_m) = \rho_0 + \rho_0 \cdot p_1 \cdot \frac{M}{T} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_m)}{\varepsilon_m} \cdot \{1 - (1 - \varepsilon_m)^m\} \quad \text{PAS} \quad (4.12)$$

$$\rho_m^+ = \rho_m(t = t_m) = \rho_0 + \rho_0 \cdot p_1 \cdot \frac{M}{T} \cdot (1 - \varepsilon_m) \cdot m \quad \text{PAR} \quad (4.13)$$

Como o objetivo é avaliar a condição do componente até sua renovação, é necessário estimar sua PFD média neste período. Para isto, considerando que é realizada no mínimo uma manutenção e no máximo m manutenções até L , tem-se que a PFD média do componente em um período de renovação L , $\bar{\rho}$, pode ser expressa através das Equações (4.14) e (4.15).

$$\bar{\rho} = \rho_0 + \frac{1}{2} \rho_0 p_1 \frac{M}{T} + \frac{1}{(m+1)} \rho_0 p_1 \frac{M}{T} \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{(1 - \varepsilon_i)}{\varepsilon_i} [1 - (1 - \varepsilon_i)^i] \right\} \quad \text{PAS} \quad (4.14)$$

$$\bar{\rho} = \rho_0 + \frac{1}{2} \rho_0 p_1 \frac{M}{T} \left\{ 1 + \sum_{i=1}^m \left[\frac{2i}{m+1} (1 - \varepsilon_{[m-(m-i)]}) \right] \right\} \quad \text{PAR} \quad (4.15)$$

Onde $M = L/(m+1)$.

4.1.1.2 Efeito downtime

Durante um período de renovação, L , Martorell *et al.* (2017a) cita que o efeito *downtime* é composto pelo tempo total em que o componente permanece indisponível devido à realização das inspeções programadas, de eventuais manutenções corretivas, das manutenções preventivas e da renovação ou substituição do componente.

As inspeções são programadas para ocorrer a cada T horas, com uma duração média de τ horas por ação de inspeção. Dessa forma, a indisponibilidade média por ciclo de renovação devido ações de inspeção, \bar{u}_T , é estimada pela Equação (4.16).

$$\bar{u}_T = \frac{\tau}{T} \quad (4.16)$$

O principal objetivo das inspeções é detectar falhas ocultas para que o componente possa ser posto novamente em funcionamento antes de ser demandado. A eficiência dos testes de inspeção pode ser medida, segundo Martón; Sánchez e Martorell (2015), por um parâmetro denominado eficiência de teste (η). Este parâmetro faz com que a PFD média em um período de renovação seja dividida em duas contribuições, uma associada as falhas detectadas e outra às não detectadas, como mostra a Equação (4.17).

$$\bar{\rho} = \bar{\rho}_D + \bar{\rho}_U = \eta \cdot \bar{\rho} + (1 - \eta) \cdot \bar{\rho} \quad (4.17)$$

Onde a eficiência da inspeção, η , varia no intervalo $[0, 1]$.

Na Equação (4.17), a primeira contribuição representa a PFD média de um período de renovação associada as falhas detectadas, $\bar{\rho}_D$, e a segunda parte representa a PFD média de um período de renovação associada as falhas não detectadas, $\bar{\rho}_U$.

Quando uma falha oculta é detectada durante a inspeção, deve ser realizada imediatamente uma manutenção corretiva, que dura em média μ horas. A indisponibilidade média por ciclo de renovação devido ações de manutenção corretiva, \bar{u}_C , é estimada pela Equação (4.18).

$$\bar{u}_C = \frac{\mu}{T} \cdot \bar{\rho}_D = \frac{\mu}{T} \cdot \eta \cdot \bar{\rho} \quad (4.18)$$

Além das inspeções, outras duas ações são programadas para serem executadas durante o período de renovação do componente: manutenções preventivas e a renovação ou substituição do componente. As manutenções preventivas são programadas para ocorrer a cada M horas e duram em média σ horas. Já a renovação ou substituição do componente é programada para ocorrer após L horas e tem duração média de θ horas.

As indisponibilidades médias por ciclo de renovação devido ações de manutenção preventiva e renovação ou substituição são estimadas através das Equações (4.19) e (4.20), respectivamente.

$$\bar{u}_M = \frac{\sigma}{M} \quad (4.19)$$

$$\bar{u}_O = \frac{\theta}{L} \quad (4.20)$$

Onde $M = L/(m + 1)$

Por fim, a partir da soma das contribuições de indisponibilidade média, \bar{u}_R , \bar{u}_C , \bar{u}_T , \bar{u}_M e \bar{u}_O , é possível estimar a indisponibilidade total média do componente em um período de renovação ou substituição, \bar{u}_{TOTAL} , como mostra a Equação (4.21).

$$\bar{u}_{TOTAL} = \bar{u}_R + \bar{u}_C + \bar{u}_T + \bar{u}_M + \bar{u}_O \quad (4.21)$$

4.1.2 Indisponibilidade de componentes *standby* em um período de renovação L , sob Efeito de Segurança: Uma otimização contra risco

Na seção anterior, uma nova maneira de estimar a indisponibilidade total média de componentes de segurança em um período de renovação L foi proposta, pela Equação (4.21), onde a eficácia da manutenção melhora continuamente a cada nova ação realizada. Embora esta abordagem proporcione melhorias em \bar{u}_{TOTAL} , segundo (Ahmadi e Kumar (2011), há casos em que é exigido um certo nível de disponibilidade de componentes de segurança para reduzir o risco de eventos com consequências indesejadas, logo determinadas ações são requeridas para impedir que o componente ultrapasse um limite máximo de indisponibilidade, até sua renovação.

Para atender estes casos, um Efeito de Segurança deve ser incorporado ao modelo para evitar que as tomadas de decisão, sobre as políticas de inspeção e manutenção, gerem uma indisponibilidade acima do valor aceitável para o componente, até sua renovação. Dessa forma, sob o Efeito de Segurança, uma restrição de indisponibilidade máxima, \bar{u}_{TOTAL}^{max} , foi adicionada a Equação (4.21), para indicar que o valor de \bar{u}_{TOTAL} não pode ultrapassar \bar{u}_{TOTAL}^{max} em nenhum momento, antes da renovação do componente (em L). Assim, tem-se que:

$$\bar{u}_{TOTAL} = \bar{u}_R + \bar{u}_C + \bar{u}_T + \bar{u}_M + \bar{u}_O \quad \text{com} \quad \bar{u}_{TOTAL} \leq \bar{u}_{TOTAL}^{max} \quad (4.22)$$

Onde a indisponibilidade total média máxima permitida para um período de renovação, \bar{u}_{TOTAL}^{max} , é definida de acordo com o nível de disponibilidade requerida pelo(s) decisor(es), D_{req} , como expresso na Equação (4.23).

$$\bar{u}_{TOTAL}^{max} = 1 - D_{req} \quad (4.23)$$

Portanto, sob o Efeito de Segurança, é recomendado que nenhuma política de inspeção e manutenção seja definida quando a Equação (4.22) for violada.

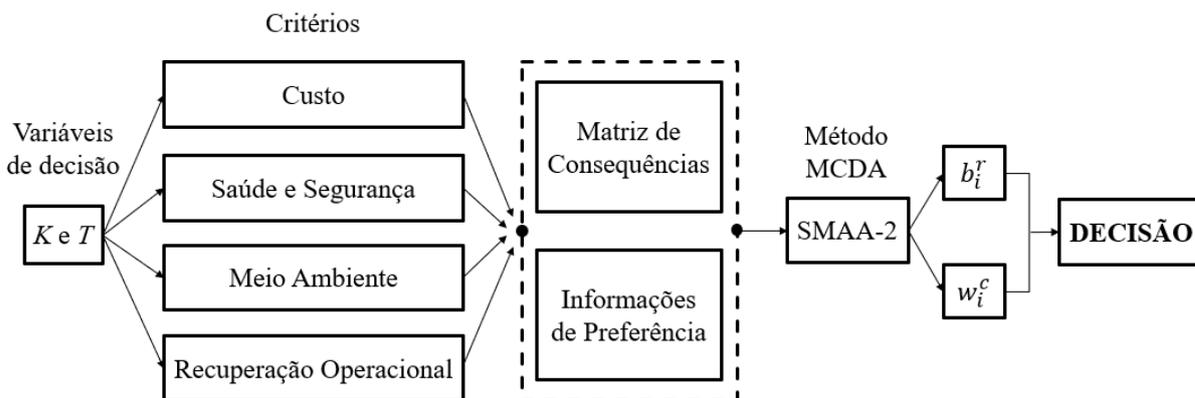
4.2 Modelo 2: Modelo Multicritério para sistemas de proteção

Como mostrado no modelo anterior, a indisponibilidade de componentes de segurança pode ser advinda de diferentes contribuições, como relacionadas a não confiabilidade e as ações de inspeção, manutenção e renovação. Embora essas ações gerem custos operacionais, a sua não realização pode implicar em eventos que venham a causar sérios danos à saúde dos trabalhadores, a segurança da população local, ao meio ambiente e a toda instalação operacional. Em casos como estes, Geldermann *et al.* (2009) citam que a atuação de uma gestão coerente e eficaz é indispensável, em razão de envolver decisões complexas, onde, normalmente, muitos objetivos conflitantes precisam ser tratados, bem como suas prioridades e as diferentes perspectivas dos *stakeholders*. Neste sentido, muitos gestores de manutenção buscam tomar decisões sob as políticas de inspeção de sistemas de proteção levando em consideração mais de um critério.

Geldermann *et al.* (2009) reforçam que a análise de decisão multicritério (MCDA) pode ajudar a garantir a transparência do problema durante o processo decisório, o que, conseqüentemente, possibilita tomadas de decisão mais seguras e coerentes. Contudo, De Almeida (2013) ressalta que em problemas de decisão multicritério são comuns situações onde o decisor tem conhecimento sobre a ordem de preferência dos critérios, mas não consegue mensurar com exatidão seus pesos, gerando incerteza a respeito do real grau de importância de cada critério.

Sob esse contexto, o Modelo 2 é proposto com o intuito de auxiliar gestores de manutenção a definir a melhor política de inspeção para um sistema de proteção, em situações onde mais de um critério precisam ser avaliados e há incerteza sobre as informações de preferência do decisor. A Figura 18 expressa a estrutura do Modelo 2.

Figura 18 – Modelo 2



Fonte: O autor (2019)

O problema de decisão consiste em definir o número de inspeções, K , e o intervalo de tempo entre elas, T , até a restauração do sistema (em KT), de modo a minimizar o Custo Total e as Criticidades de Saúde e Segurança, de Meio Ambiente e de Recuperação Operacional. Dessa forma, como mostrado na Figura 18:

- 1) Diferentes valores de K e T são avaliados para cada critério e uma matriz de consequências é gerada com os valores obtidos;
- 2) A ordem de preferência dos critérios é estabelecida pelo decisor e, em seguida, aplica-se o método SMAA-2, que fornecerá como resultado os índices de aceitabilidade de rank, b_i^r , e o vetor de peso central, w_i^c , de cada alternativa (K, T);
- 3) Com os resultados gerados pelo SMAA-2 é definida, então, a política de inspeção do sistema.

Para os critérios considerados neste modelo são utilizadas as seguintes notações:

C_i	Custo de uma inspeção
C_r	Custo de um reparo
C_o	Custo de oportunidade referente a perda de produção durante as ações de inspeção e reparação
C_{Res}	Custo de uma restauração
C_A	Custo de um acidente
CRI_{SS}	Criticidade de saúde e segurança devido um acidente
CRI_A	Criticidade ambiental devido um acidente
CRI_{RO}	Criticidade de recuperação operacional devido um acidente
T_i	Tempo de duração da inspeção

T_r	Tempo de duração do reparo
K	Número de inspeções até a renovação do sistema
T	Intervalo de inspeção (tempo entre duas inspeções)
φ	Taxa de chegada de demanda real do sistema de proteção
α	Parâmetro de escala
β	Parâmetro de forma
$F_N(t)$	Probabilidade condicional de falha no N -ésimo ciclo de inspeção
$MFDT_{(N,T)}$	Fração média de tempo pela qual o sistema permanece indisponível no N -ésimo ciclo de inspeção com inspeções a cada T unidades de tempo
$CT(K, T)$	Critério Custo
$SS(K, T)$	Critério Saúde e Segurança
$MA(K, T)$	Critério Meio Ambiente
$RO(K, T)$	Critério Recuperação Operacional

Os pressupostos considerados para o desenvolvimento dos critérios, são:

1. As falhas do sistema são ocultas e só podem ser detectadas por inspeção ou demanda.
2. Durante as inspeções o sistema fica indisponível.
3. As inspeções são perfeitas, de modo que uma falha sempre será detectada nas inspeções.
4. Um reparo mínimo é realizado sempre que uma falha for detectada durante uma inspeção.
5. O sistema é completamente renovado após K inspeções e assume condição de novo.
6. K e T são definidos com base em quatro critérios: custo, saúde e segurança, meio ambiente e recuperação operacional.
7. O sistema se encontra funcional após ações de inspeção, reparo e restauração.
8. A execução de inspeções, reparos e restaurações pela equipe de manutenção, não introduzem falhas no sistema.

4.2.1 Critério Custo

O sistema é inspecionado periodicamente, a cada T unidades de tempo, e após K inspeções é renovado. Até a renovação do sistema, são incorridos custos C_i para cada ação de inspeção, custos C_r para cada ação de reparo, custos C_o devido à perda de produção durante as ações de inspeção e reparo, e um custo C_A devido a ocorrência de um acidente, que refere-se a combinação de uma falha oculta com a demanda do sistema.

O valor deste critério é obtido através da soma dos custos incorridos até o instante KT . A Equação (4.24), proposta por Ahmadi e Kumar (2011), é utilizada para estimar o custo total esperado até a restauração do sistema.

$$CT(K, T) = \frac{C_i}{T} + \frac{C_r}{KT} \sum_{N=1}^K F_N(T) + \frac{C_o \cdot T_i}{T} + \frac{C_o \cdot T_r}{KT} \sum_{N=1}^K F_N(T) + \frac{C_A \cdot \varphi \cdot T}{KT} \sum_{N=1}^K MFDT_{(N,T)} + \frac{C_{Res}}{KT} \quad (4.24)$$

Onde $F_N(T)$ é descrito pela Equação (2.6).

$$F_N(t) = 1 - \exp \left[\left(\frac{(N-1)T}{\alpha} \right)^\beta - \left(\frac{(N-1)T + t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (2.6)$$

Sendo t o tempo referente a N -ésima inspeção.

Segundo Modarres (2006), a indisponibilidade de funções ocultas pode ser descrita em função do $MFDT$ (*Mean Fractional Dead Time*) que representa a fração de tempo que o sistema permanece indisponível, representada pela Equação (2.8), de Vaurio (1997) e Rausand e Vatn (1998).

$$MFDT_{(N,T)} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(1 - \exp \left[\left(\frac{(N-1)T}{\alpha} \right)^\beta - \left(\frac{(N-1)T + t}{\alpha} \right)^\beta \right] \right) dt \quad (2.8)$$

4.2.2 Critério Saúde e Segurança

Esse critério foi desenvolvido com objetivo de avaliar a criticidade de um acidente para a saúde e segurança dos trabalhadores e da população local, de acordo com a política de inspeção adotada.

Tendo em vista que diferentes combinações de K e T podem aumentar ou diminuir as chances de ocorrer um acidente, com potencial para causar consequências indesejadas aos trabalhadores ou as pessoas próximas do local do acidente, é fundamental ter conhecimento sobre os impactos de assumir determinadas políticas de inspeção.

A criticidade esperada para a Saúde e Segurança é estimada pela Equação (4.25).

$$SS(K, T) = \frac{CRI_{SS} \cdot \varphi \cdot T}{K} \sum_{N=1}^K MFDT_{(N,T)} \quad (4.25)$$

O parâmetro CRI_{SS} varia de 0 à 10 e representa a criticidade das consequências de um acidente para a Saúde e Segurança. Esse parâmetro precisa ser quantificado e pode ser estimado de acordo com a avaliação de especialistas sob as consequências causadas à Saúde e Segurança decorrentes de um acidente. Os valores para CRI_{SS} são descritos na Tabela 7 e foram adaptados de Summers; Vogtmann e Smolen (2012).

Tabela 7 – Criticidade das consequências de um acidente para a Saúde e Segurança

Criticidade	Descrição
0 – 1	Lesões registráveis dentro da instalação e/ou nenhum impacto para população fora da instalação.
2 – 3	Lesões para o trabalhador com possível perda do dia de trabalho e/ou lesões registráveis dentro da instalação (por exemplo, erupções cutâneas, cortes, queimaduras) e/ou menor impacto para a população fora da instalação.
4 – 6	Lesões de hospitalização (por exemplo, queimaduras graves, ossos quebrados) e/ou lesões para o trabalhador com possível perda de vários dias de trabalho e/ou lesões a população fora da instalação.
7 – 8	Hospitalização de 3 ou mais pessoas e/ou 1 ou mais fatalidades dentro da instalação e/ou lesões para a população fora da instalação.
9 – 10	Várias mortes em uma instalação e/ou lesões ou fatalidades para a população fora da instalação.

Fonte: Adaptado de Summers; Vogtmann e Smolen (2012)

Normalmente, as consequências de um acidente para este critério são estimadas com base em eventos que conduzem a explosões, inalação de produtos tóxicos, poluição e demais eventos (BAI; BAI, 2005). Summers; Vogtmann e Smolen (2012) sugerem tabelas com informações destinadas a apoiar a avaliação das consequências resultantes de liberações inflamáveis, contudo, as descrições contidas na Tabela 7 podem se enquadrar a outros cenários e serem utilizadas ou adaptadas para representar outras situações.

4.2.3 Critério Meio Ambiente

Segundo French e Geldermann (2005), as considerações ambientais são cruciais em muitas decisões. Desde o início dos anos 1970, as questões envolvendo o meio ambiente passaram a ganhar cada vez mais importância nas tomadas de decisão e vários setores industriais precisaram desenvolver e adotar estratégias que fossem tanto econômicas quanto ambientalmente eficientes.

Este critério visa, portanto, avaliar a criticidade de um acidente para o meio ambiente ao definir a política de inspeção de um sistema de proteção. A Equação (4.26), descreve a criticidade esperada para o Meio Ambiente.

$$MA(K, T) = \frac{CRI_A \cdot \phi \cdot T}{K} \sum_{N=1}^K MFDT_{(N, T)} \quad (4.26)$$

O parâmetro CRI_A representa a criticidade das consequências de um acidente para o meio ambiente. O valor de CRI_A deve ser quantificado e pode ser estimado por especialistas. A Tabela 8 descreve os valores para CRI_A e foram adaptados de Bai e Bai (2014).

Tabela 8 – Criticidade das consequências de um acidente para o Meio Ambiente

Criticidade	Descrição
0 – 1	Pequena ou nenhuma liberação de substâncias poluentes ou tóxicas; sem impactos consideráveis ao meio ambiente.
2 – 3	Pequena liberação de substâncias poluentes ou tóxicas; a substância liberada se decompõe rapidamente na natureza. Período de recuperação < 1 ano.
4 – 6	Liberação mediana de substâncias poluentes ou tóxicas; a substância liberada pode levar algum tempo para se decompor na natureza ou pode ser facilmente neutralizado ou removida. Período de recuperação < 3 anos.
7 – 8	Grande liberação de substâncias poluentes ou tóxicas; a substância liberada pode demorar para se decompor ou exige grandes esforços para ser removida ou neutralizada. Período de recuperação < 10 anos.
9 – 10	Grande liberação de substâncias poluentes ou tóxicas; a substância liberada demora muito tempo para se decompor e não pode ser removida. Período de recuperação > 10 anos.

Fonte: Adaptado de Bai e Bai (2014)

Bai e Bai (2014) citam que, geralmente, as consequências ambientais são estimadas com base em eventos que conduzam ao lançamento de substâncias ou materiais com potencial para prejudicar o meio ambiente próximo, a flora, a fauna e a água do mar, e que tanto o tipo quanto a quantidade dessas substâncias são considerações indispensáveis para estimar a criticidade das consequências causadas ao meio ambiente devido a ocorrência de um acidente.

4.2.4 Critério Recuperação Operacional

O objetivo deste critério é avaliar a criticidade de um acidente para reestabelecer o funcionamento do sistema, de acordo com a política de inspeção adotada.

Tendo em vista que diferentes combinações de K e T podem aumentar ou diminuir as chances de ocorrer um acidente, com potencial para causar a parada do sistema por longos períodos de tempo, é fundamental ter conhecimento sobre os impactos de assumir determinadas políticas de inspeção.

A criticidade esperada para a Recuperação Operacional é estimada pela Equação (4.27).

$$RO(K, T) = \frac{CRI_{RO} \cdot \varphi \cdot T}{K} \sum_{N=1}^K MFDT_{(N, T)} \quad (4.27)$$

O parâmetro CRI_{RO} representa a criticidade das consequências de um acidente para a recuperação operacional do sistema. Esse parâmetro precisa ser quantificado e pode ser estimado de acordo com a avaliação de especialistas. Os valores para CRI_{RO} são descritos na Tabela 9 e foram estabelecidos com base nas descrições de Liu *et al.* (2012), sobre período de recuperação operacional, e Baghaei (2013), sobre perdas de produção.

Tabela 9 – Criticidade das consequências de um acidente para a Recuperação Operacional

Criticidade	Descrição
0 – 1	A instalação seria posta novamente em estado operacional rapidamente após um acidente. Até 2 dias.
2 – 3	A instalação seria posta novamente em estado operacional dentro de 1 semana após um acidente.
4 – 6	A maior parte da instalação seria posta novamente em estado operacional dentro de 1 mês após um acidente.
7 – 8	A maior parte da instalação seria posta novamente em estado operacional dentro de 6 mês após um acidente.
9 – 10	A instalação completa levaria mais de 2 anos para ser posta novamente em estado operacional.

Fonte: Adaptada de Liu et al. (2012) e Baghaei (2013)

4.3 Aplicação dos modelos propostos: em que situações é mais recomendada a utilização do Modelo 1 e do Modelo 2?

Em geral, é comum as organizações elaborarem seus planos de ação de acordo com níveis de planejamento estratégico, tático e operacional. Basicamente, as diferenças entre esses níveis de planejamento estão associadas ao horizonte de tempo das ações, aos envolvidos e as consequências das ações para a organização como um todo (CHIAVENATO, 2010; DE OLIVEIRA, 2006).

As decisões estratégicas são decisões infrequentes, tomadas pelos principais líderes de uma organização, e afetam criticamente a saúde e a sobrevivência da mesma (HAUGEN; EDWIN, 2017; MINTZBERG, 1992). Montibeller e Franco (2011) citam que as decisões estratégicas são vitais para as organizações, no entanto apresentam grandes desafios como:

- A presença de altos níveis de incerteza associada ao futuro da organização e a falta de conhecimento completo sobre seu ambiente externo;
- A necessidade de considerar múltiplos objetivos estratégicos (muitas vezes conflitantes entre si);
- A interconectividade de opções estratégicas complexas;
- As consequências de longo prazo resultantes da implementação de uma estratégia escolhida; e
- A necessidade de envolvimento das partes interessadas na negociação de intenções estratégicas.

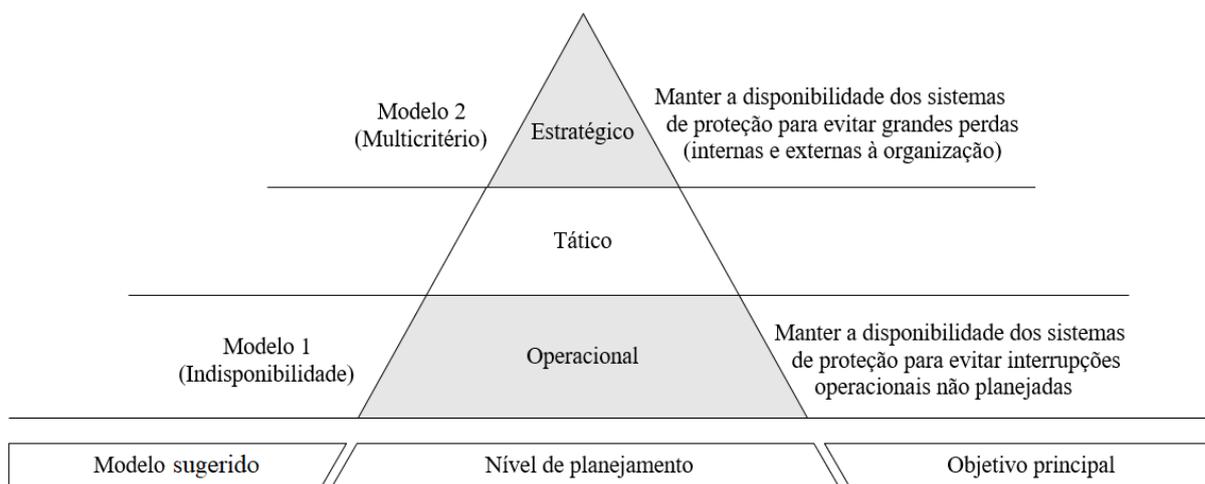
Dentre estes desafios, Montibeller e Franco (2011) destacam os altos níveis de incerteza, a inter-relação entre as escolhas e as consequências de longo prazo como os três principais desafios das decisões estratégicas.

As decisões táticas geram consequências de médio prazo e são tomadas pelo nível gerencial para partes específicas da organização (por exemplo, um setor ou departamento), com foco em definir ações para atingir os objetivos estabelecidos no planejamento estratégico. Já as decisões operacionais são destinadas a atividades e processos rotineiros da organização, onde busca-se planejar atividades, tempos e recursos, avaliar riscos, controlar processos e definir demais ações para manter a boa fluidez das operações a um curto prazo (CHIAVENATO, 2010; DE OLIVEIRA, 2006).

A inter-relação entre esses níveis de planejamento é essencial para o sucesso de uma organização e o uso de ferramentas adequadas, como forma de apoio as tomadas de decisão, pode impactar significativamente nos resultados. Kongsvik *et al.* (2015), por exemplo, citam que melhorar o apoio à decisão é uma medida fundamental para evitar acidentes graves.

Sob esse contexto, a Figura 19 indica qual dos modelos propostos neste trabalho é mais apropriado para utilização nas tomadas de decisão de uma organização.

Figura 19 – Utilização dos modelos propostos de acordo com o nível de planejamento organizacional



Fonte: O autor (2019)

Segundo Haugen e Edwin (2017), em um ambiente operacional, as decisões concentram-se em dois principais aspectos: 1) manter a integridade da planta; e 2) gerenciar atividade visando controlar o nível de risco da planta, de acordo com os limites aceitáveis. Isso exige dos gestores responsáveis uma boa compreensão a respeito do status das

instalações, do funcionamento das atividades operacionais e da forma como elas interagem, além dos pontos fracos que incidem sobre a proteção contra acidentes.

Desse modo, o Modelo 1 é mais apropriado para apoiar decisões operacionais, em razão de fornecer informações estritamente direcionadas ao funcionamento das operações associadas a sistemas de proteção, pois reflete os interesses internos da organização na busca de manter as operações em pleno funcionamento (sem interrupções não planejadas), evitando, assim, o surgimento de potenciais acidentes. Ou seja, através do Modelo 1, os gestores de manutenção ampliam seu campo de visão sobre o estado de disponibilidade dos sistemas de proteção, o que possibilita ter um maior controle sobre o funcionamento das atividades no cotidiano da organização.

Já o Modelo 2 é mais apropriado para apoiar decisões estratégicas, em razão de sua estrutura ter sido construída para avaliar os diferentes impactos de uma decisão tanto para partes internas da organização (como custos, recuperação operacional e bem-estar dos funcionários) quanto para partes externas (como meio ambiente e a segurança da população local), além de levar em consideração a presença de incertezas. Essa sugestão é reforçada pelo estudo de Montibeller e Franco (2011) que discutem o uso de análise de decisão multicritério para apoiar a tomada de decisões estratégicas nas organizações e argumentam que lidar com incertezas e fazer uso de métodos MCDA são bastante úteis para apoiar tais decisões. Portanto, com o Modelo 2, a alta gerência pode melhorar suas decisões estratégicas ao definir ações que apresentem um bom desempenho a longo prazo, gerando benefícios para organização de forma global e protegendo áreas adjacentes contra eventos indesejados.

Para melhor compreensão do funcionamento dos Modelos 1 e 2, o capítulo seguinte apresenta uma aplicação numérica para cada um, avaliando seus comportamentos sob diferentes análises.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será apresentada uma aplicação numérica para cada modelo de decisão proposto, assim como os resultados de tais aplicações.

5.1 Aplicação Numérica para o Modelo 1

Nesta seção, uma aplicação numérica é realizada para ilustrar o Modelo 1. Os dados de entrada utilizados para esta aplicação estão contidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados de entrada para aplicação do Modelo 1

Parâmetro	Valor	Unidade de medida
ρ_0	$1,82 \cdot 10^{-3}$	-
$p1$	0,073	-
L	87600	Horas
η	0,6	-
τ	1	Horas
σ	1	Horas
μ	2,6	Horas
θ	6	Horas
ε_1	0,6	-
ε^*	0,9	-
φ	0,2	-

Fonte: Adaptado de Martorell et al. (2017a)

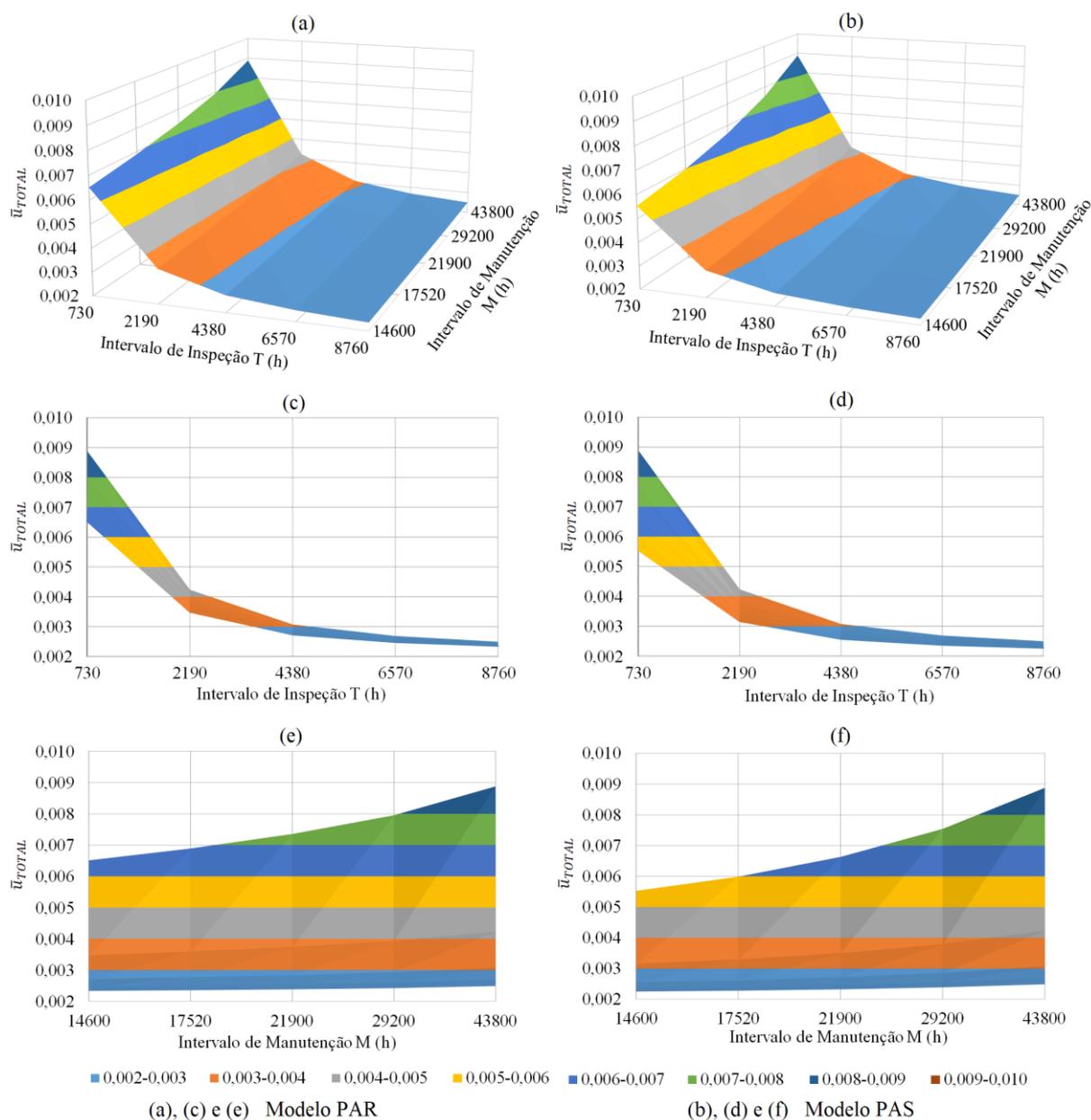
Os dados da Tabela 10 foram considerados com o objetivo de analisar o problema de decisão apresentado por Martorell et al. (2017a) sob uma perspectiva diferente, em que a eficácia das ações de manutenção, ε , deixa de ser uma constante e passa a atuar como uma função de MC dependente do número de manutenções, ε_m , em um ciclo de renovação, L . Os resultados da aplicação foram divididos em 6 análises, realizadas com o objetivo de mostrar as consequências das decisões sobre diferentes perspectivas.

5.1.1 Análise 1: Indisponibilidade total média do componente em um período de renovação, \bar{u}_{TOTAL}

Os gráficos apresentados nas Figuras Figura 20 e Figura 21 mostram a indisponibilidade total média do componente em um período de renovação, \bar{u}_{TOTAL} , para os modelos PAR e PAS, considerando a melhoria da eficácia da manutenção de acordo com a Lei do Poder (Figura 20) e com a Lei Exponencial (Figura 21). A aplicação numérica foi realizada para

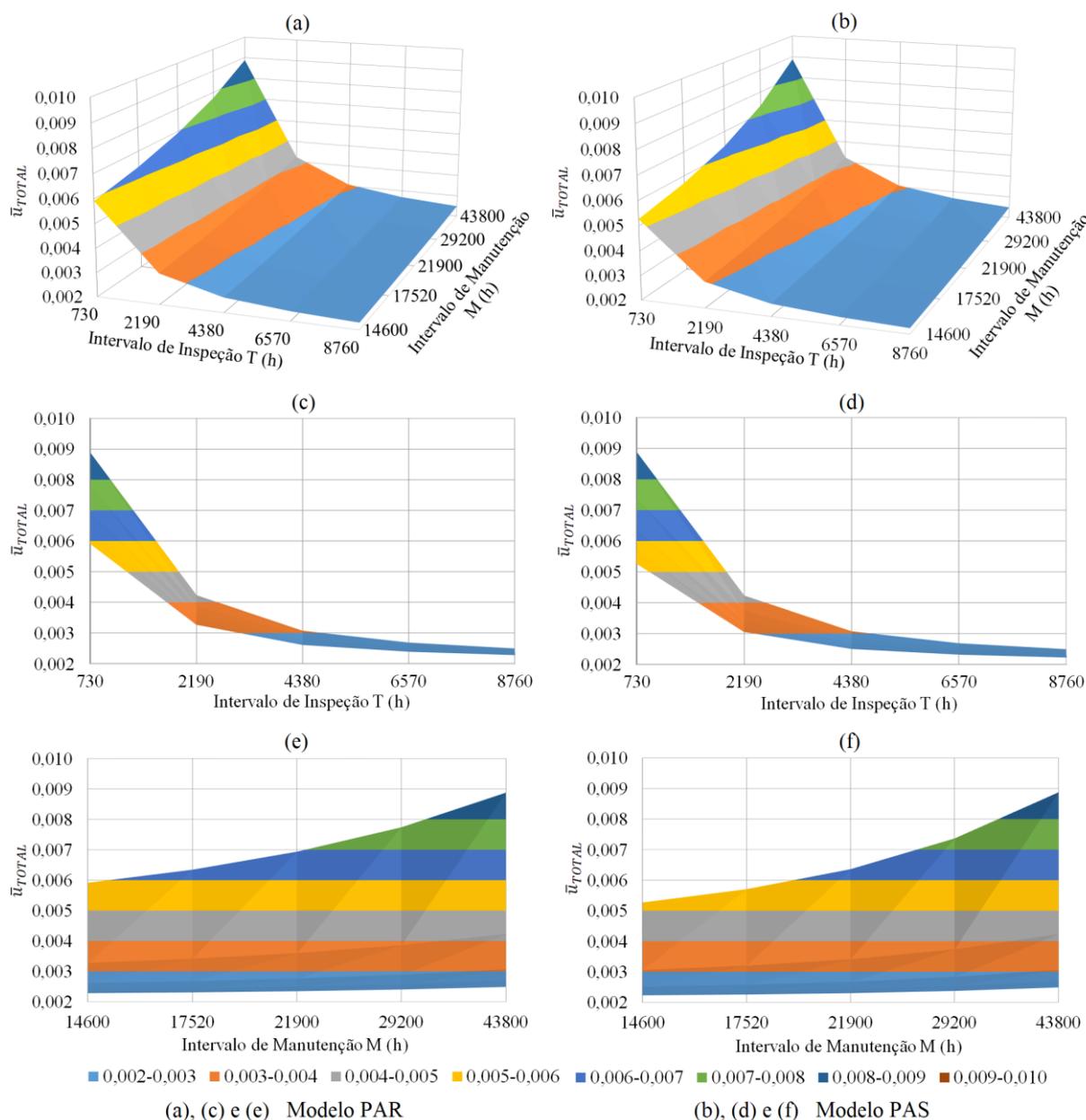
diferentes valores de T e M , onde M é definido de acordo com o número de manutenções (m) assumido para o período de renovação (L). Desse modo, para $L=87600h$, caso o decisor opte por realizar apenas uma manutenção até a renovação do componente, o intervalo de manutenção M será de 43800h. Realizando duas manutenções, $M=29200h$; realizando três manutenções, $M=21900h$; realizando quatro manutenções, $M=17520 h$; e realizando cinco manutenções, $M=14600h$.

Figura 20 – Indisponibilidade total média para os modelos PAR e PAS considerando a eficácia da manutenção sob a Lei do Poder



Fonte: O autor (2019)

Figura 21 – Indisponibilidade total média para os modelos PAR e PAS considerando a eficácia da manutenção sob a Lei Exponencial



Fonte: O autor (2019)

Nas Figuras Figura 20 e Figura 21, os gráficos (a), (c) e (e) representam a indisponibilidade total média do componente para o modelo PAR e os gráficos (b), (d) e (f) para o modelo PAS. Considerando a eficácia da manutenção sob a Lei do Poder (Figura 20), em ambos os modelos, PAR e PAS, a máxima indisponibilidade foi obtida para $T=730h$ e $M=43800h$, com o valor de 0,008877, enquanto a menor indisponibilidade foi obtida para $T=8760h$ e $M=14600h$, com valores de 0,002336 para o modelo PAR e 0,002254 para o modelo PAS. Considerando a eficácia da manutenção sob a Lei Exponencial (Figura 21), em

ambos os modelos, PAR e PAS, as indisponibilidades máxima e mínima também foram obtidas para os mesmos valores de T e M da Figura 20, ou seja, $T=730h$ e $M=43800h$ (máxima indisponibilidade), com valor de 0,008877 tanto para o PAR quanto para o PAS, e $T=8760h$ e $M=14600h$ (mínima indisponibilidade), com valor de 0,002286 para o modelo PAR e 0,002233 para o modelo PAS. Isso mostra que a indisponibilidade do componente é menor quando são assumidos grandes intervalos de inspeção e pequenos intervalos de manutenção. Em outras palavras, isso indica a adoção de políticas com menos ações de inspeção e mais ações de manutenção.

Analisando paralelamente os modelos PAR e PAS, nas Figuras Figura 20 e Figura 21, nota-se que ambos se comportam de forma semelhante. No entanto, o modelo PAS apresenta resultados ligeiramente melhores. Isso pode ser justificado pelo fato do modelo PAS reduzir a degradação do componente proporcionalmente a seu estado imediatamente antes da primeira manutenção, enquanto o PAR reduz proporcionalmente apenas a degradação do componente obtida da manutenção anterior.

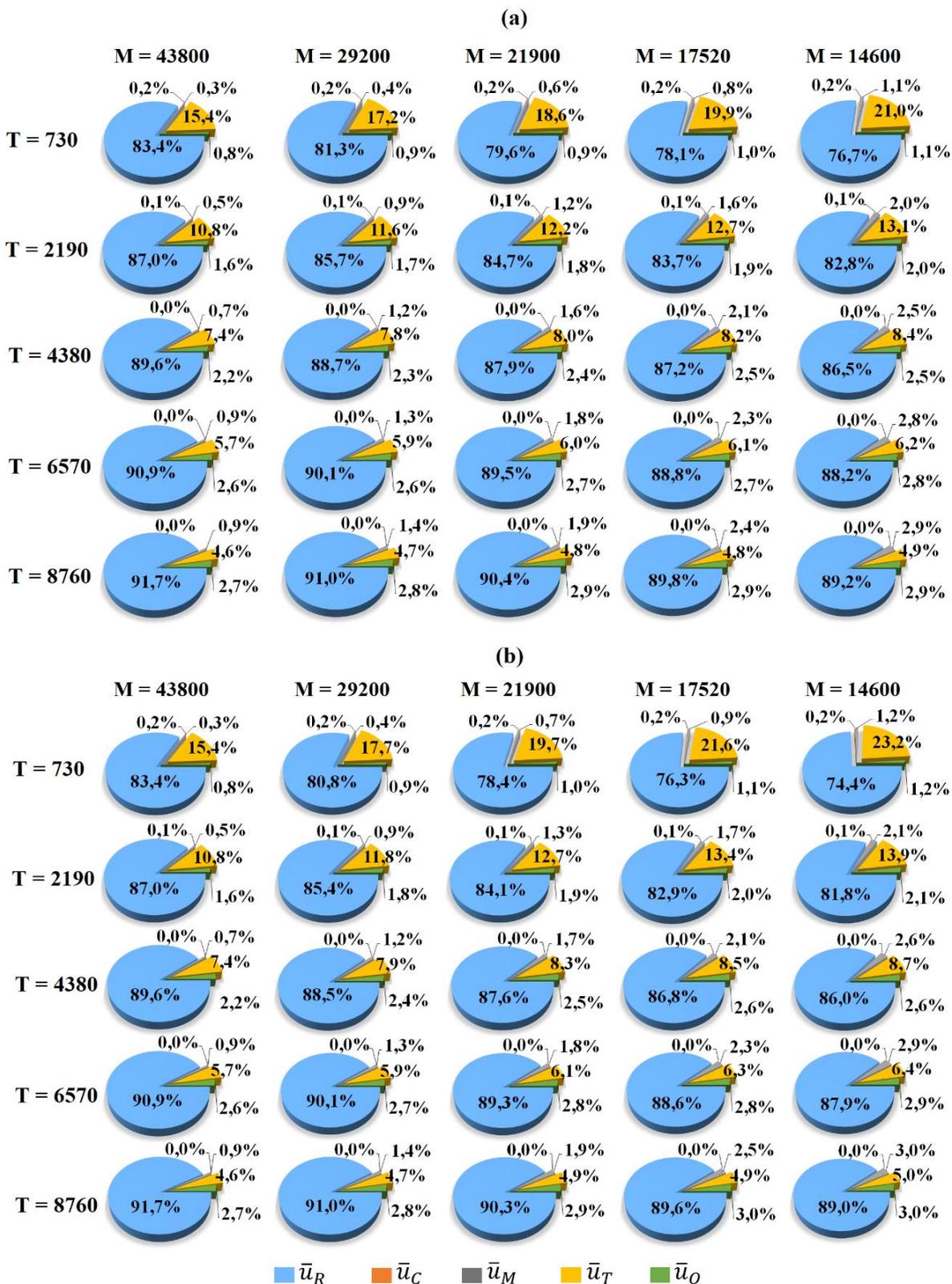
Com relação ao comportamento de \bar{u}_{TOTAL} nas Figuras Figura 20 e Figura 21, notou-se que, apesar dos valores máximo e mínimo de \bar{u}_{TOTAL} nos modelos PAR e PAS serem próximos tanto para a eficácia da manutenção sob a Lei do Poder quanto sob a Lei Exponencial, a indisponibilidade do componente reduz em maior proporção quando a eficácia da manutenção atua sob a Lei Exponencial (Figura 21).

5.1.2 Análise 2: Contribuições individuais para Indisponibilidade total média do componente em um período de renovação

Como foi apresentado na Seção 4.1, a \bar{u}_{TOTAL} é resultante da soma de cinco contribuições de indisponibilidade. Dessa forma, dado que o objetivo do Modelo 1 consiste em minimizar a \bar{u}_{TOTAL} , é fundamental identificar quais dessas contribuições geram o maior impacto na \bar{u}_{TOTAL} e, assim, poder atuar com mais rigor sobre a causa raiz do problema.

As Figuras Figura 22 e Figura 23 apresentam, em percentual, o quanto cada uma das cinco indisponibilidades contribuem para a \bar{u}_{TOTAL} . A Figura 22 mostra os resultados obtidos para o Modelo PAR e a Figura 23 para o Modelo PAS.

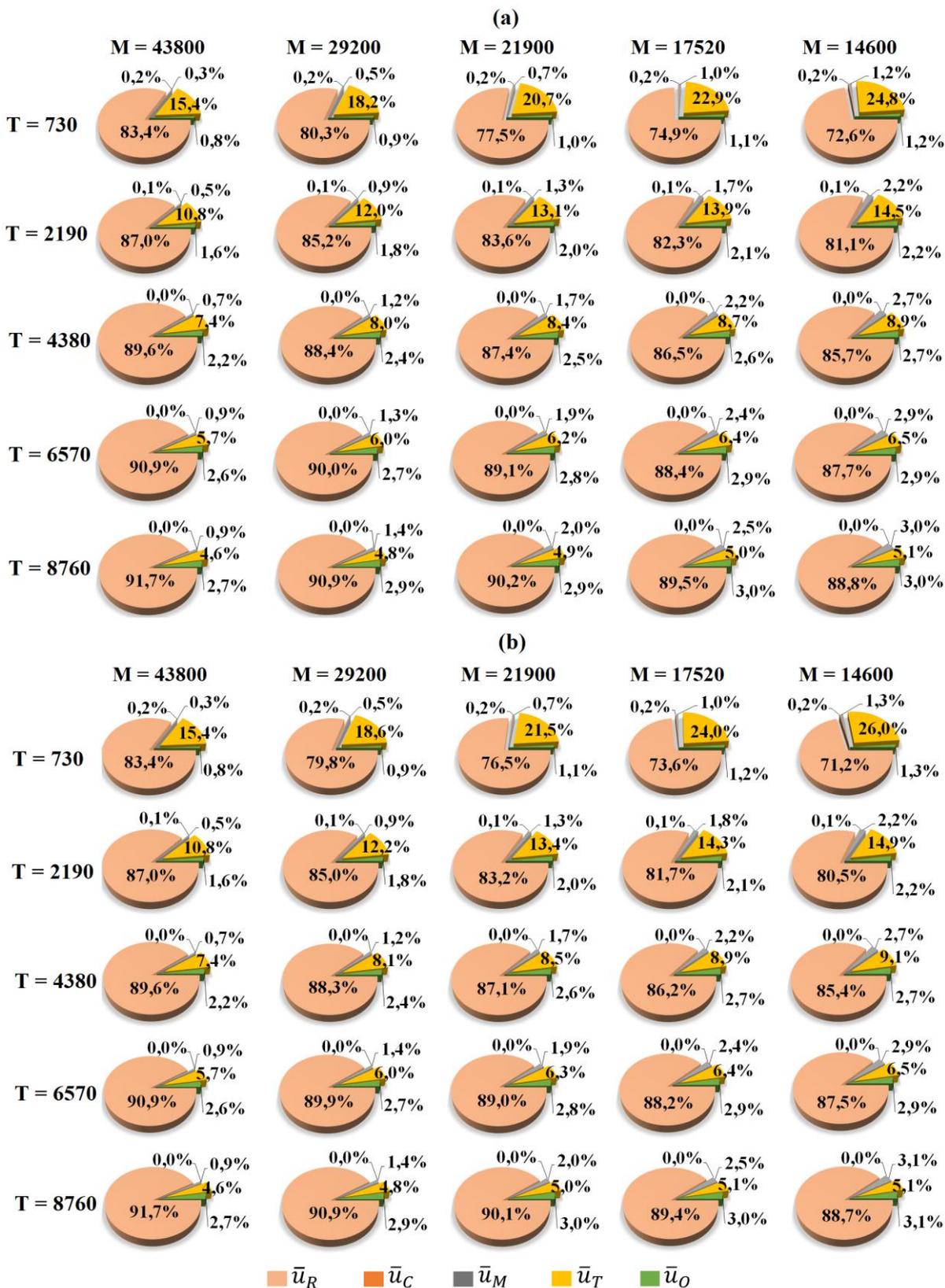
Figura 22 – Contribuições para indisponibilidade total média do componente sob o Modelo PAR



(a) \mathcal{E}_m sob a Lei do Poder (b) \mathcal{E}_m sob a Lei Exponencial

Fonte: O autor (2019)

Figura 23 – Contribuições para indisponibilidade total média do componente sob o Modelo PAS



(a) ϵ_m sob a Lei do Poder (b) ϵ_m sob a Lei Exponencial

Fonte: O autor (2019)

Analisando os resultados apresentados nas Figuras Figura 22 e Figura 23, nota-se que a indisponibilidade média devido a não confiabilidade, \bar{u}_R , é a que mais contribui para \bar{u}_{TOTAL} em todos os cenários avaliados, ou seja, quando a eficácia da manutenção comporta-se tanto sob a Lei do Poder quanto sob a Lei Exponencial, seja nos modelos PAR ou PAS. A Tabela 11 mostra, de forma resumida, os principais pontos sobre a contribuição de \bar{u}_R em \bar{u}_{TOTAL} .

Tabela 11 – Pontos de menor e maior contribuição da Não confiabilidade para indisponibilidade média total do componente

\bar{u}_R	ε_m sob a Lei do Poder				ε_m sob a Lei Exponencial			
	PAR	PAS	T	M	PAR	PAS	T	M
Menor contribuição	76,7%	72,6%	730 h	14600 h	74,4%	71,2%	730 h	14600 h
Maior contribuição	91,7%	91,7%	8760 h	43800 h	91,7%	91,7%	8760 h	43800 h

Fonte: O autor (2019)

A não confiabilidade é responsável por, pelo menos, 71,2% da \bar{u}_{TOTAL} , podendo atingir até 91,7%. A menor contribuição de \bar{u}_R (71,2%) ocorreu no Modelo PAS, com $T=730h$, $M=14600h$ e a eficácia da manutenção sob a Lei Exponencial, enquanto a maior contribuição (91,7%) ocorreu em ambos os modelos (PAR e PAS), com $T=8760h$, $M=43800h$ e assumindo a eficácia da manutenção tanto sob a Lei do Poder quanto sob a Lei Exponencial. Com isso, fica evidente que a não confiabilidade é a causa raiz da \bar{u}_{TOTAL} . Conseqüentemente, é o fator que necessita receber melhorias com maior urgência.

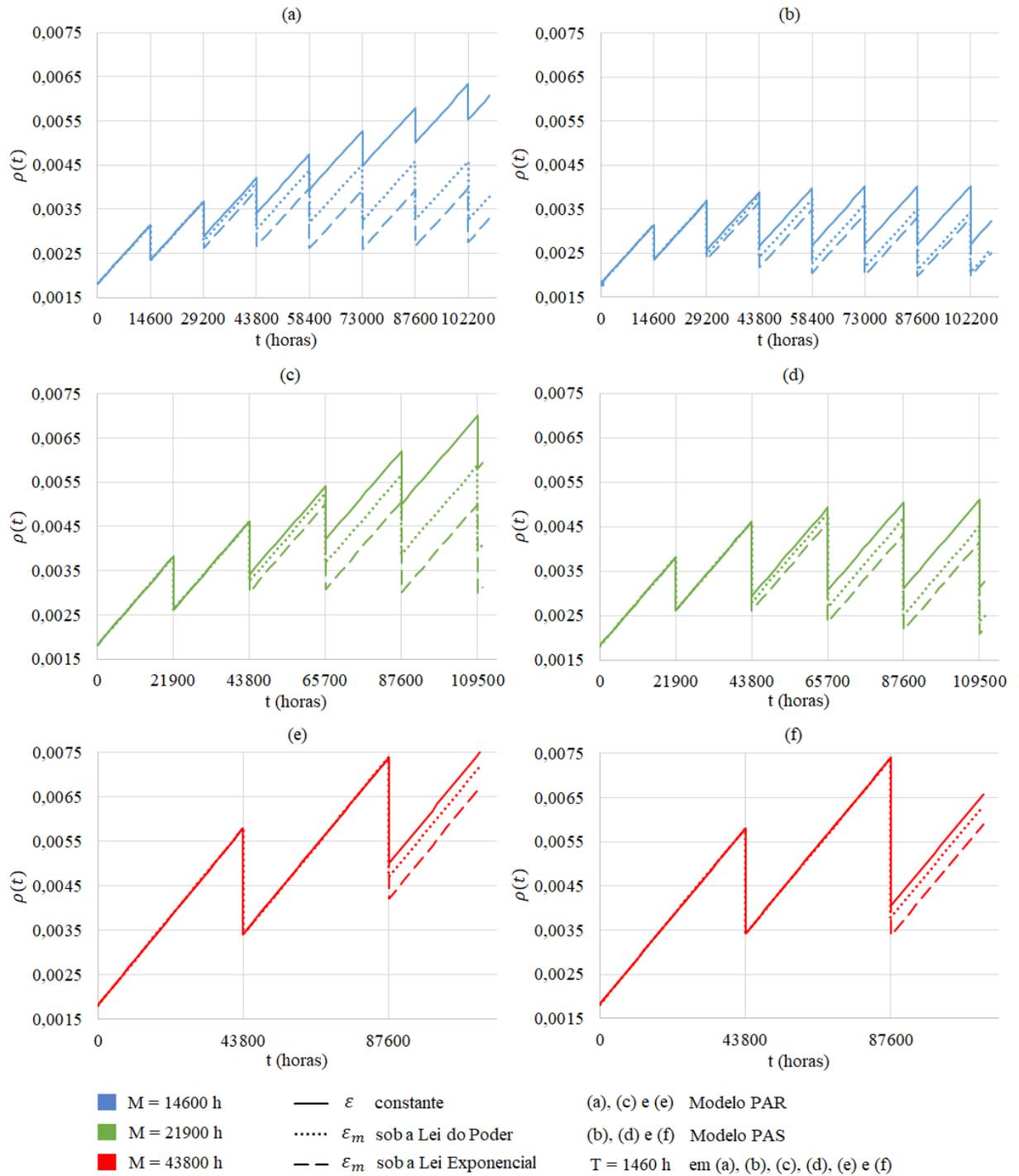
5.1.3 Análise 3: Comportamento da Não Confiabilidade ao longo do tempo

Esta análise foi realizada após a \bar{u}_R ser identificada como a causa raiz da \bar{u}_{TOTAL} . O intuito foi verificar o que ocorre com a PFD do componente ao longo do tempo quando são assumidas diferentes eficácias de manutenção e diferentes valores para T e M . A análise para estes cenários foi realizada por meio das equações (4.4), (4.14) e (4.15) e é apresentada pelas Figuras Figura 24, Figura 25 e Figura 26, que mostram o comportamento da PFD do componente em um horizonte de tempo fixo (partindo de $t=0$ até $t=110960h$), com $T=1460h$ abordado na Figura 24, $T=2190h$ na Figura 25 e $T=2920h$ na Figura 26.

Nos gráficos (a) e (b), (c) e (d), e (e) e (f), uma ação de manutenção é realizada a cada 14600h, 21900h e 43800h, respectivamente. Isso implica em diferentes números de manutenções dentro do horizonte de tempo considerado, ou seja, quando $M=14600h$, são

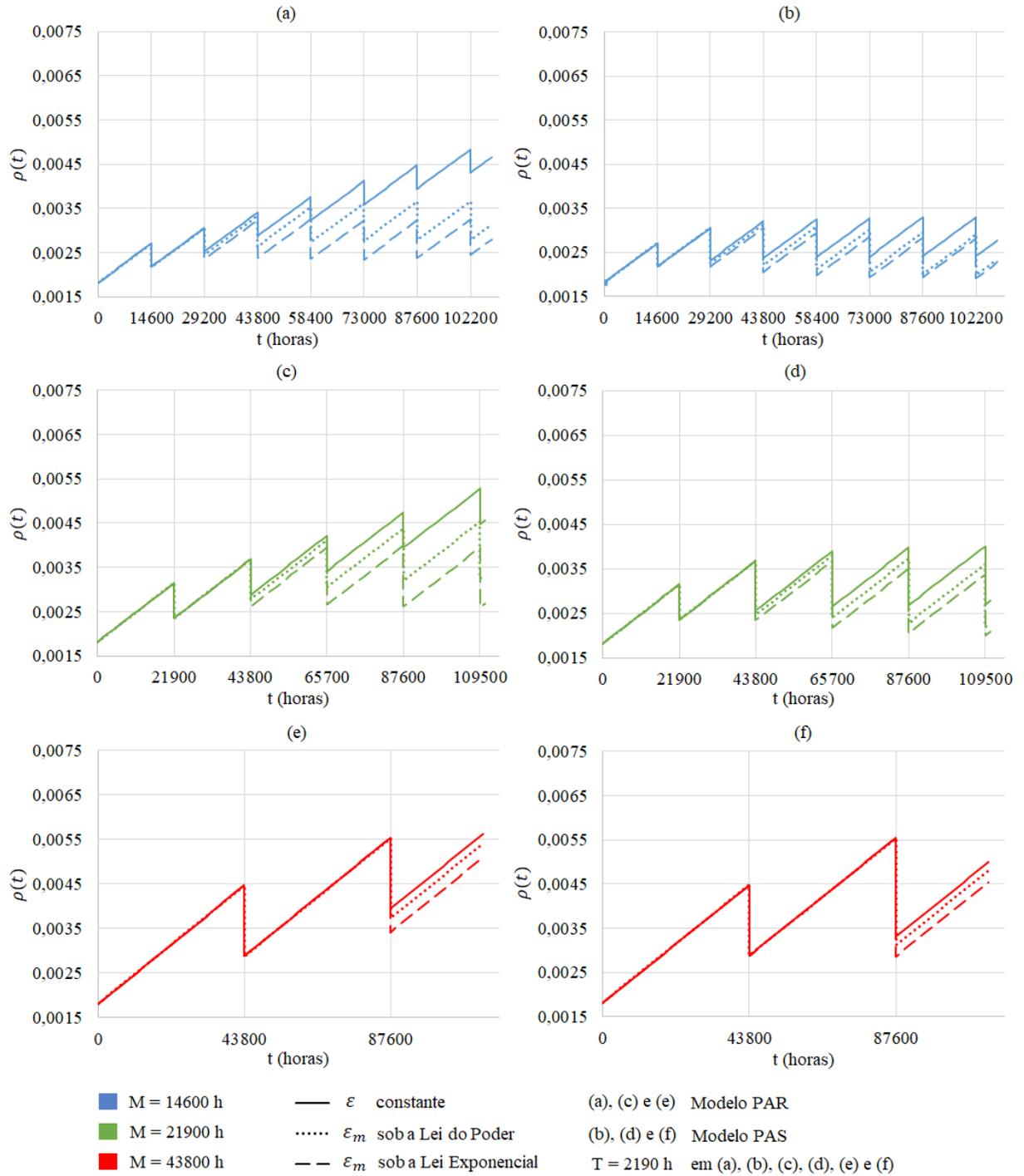
realizadas 7 manutenções; quando $M=21900h$, são realizadas 5 manutenções; e quando $M=43800h$, são realizadas apenas 2 manutenções.

Figura 24 – PFD do componente para $T=1460$ e diferentes intervalos de manutenção e eficácias de manutenção



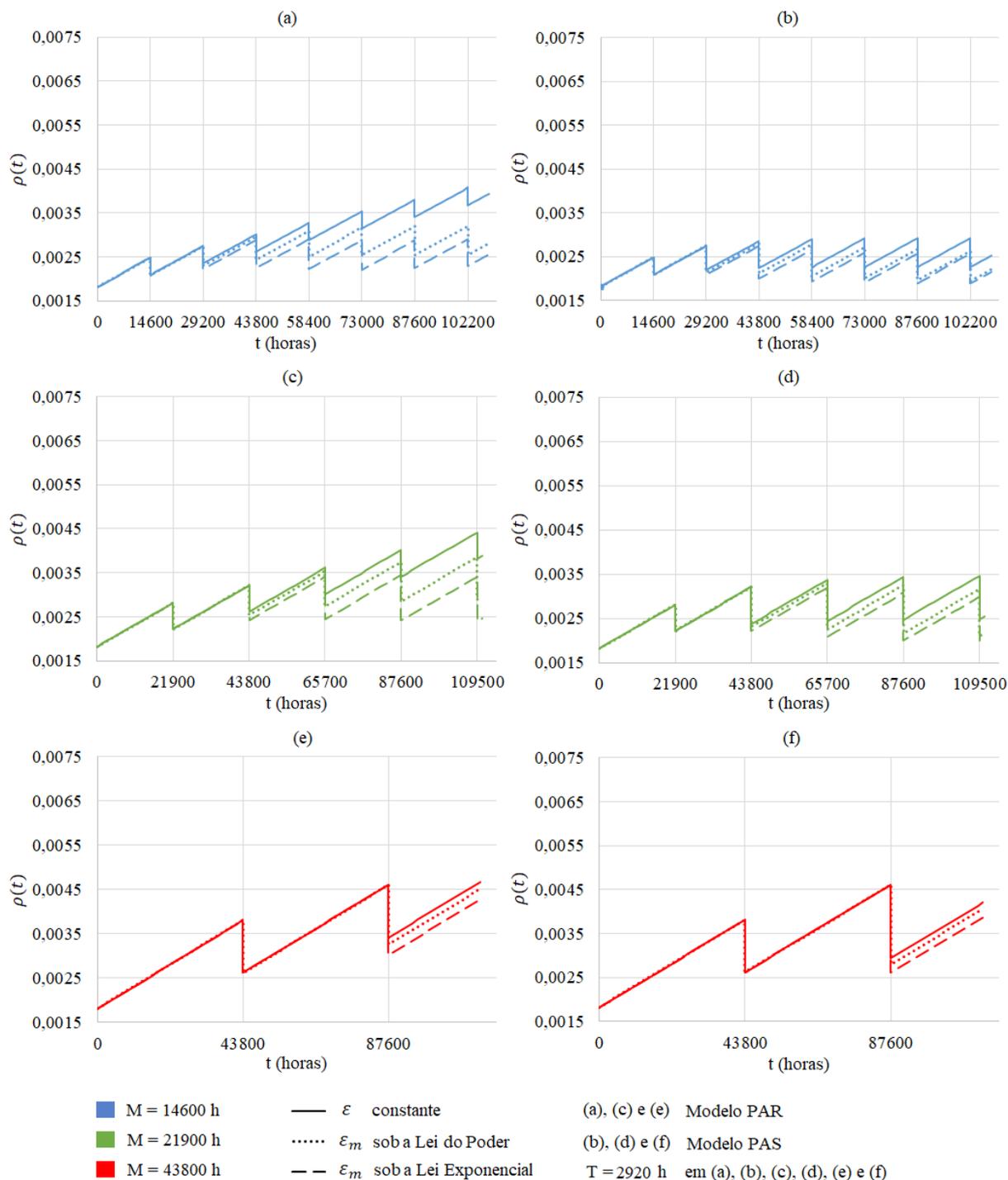
Fonte: O autor (2019)

Figura 25 – PFD do componente para $T=2190$ e diferentes intervalos de manutenção e eficácias de manutenção



Fonte: O autor (2019)

Figura 26 – PFD do componente para $T=2920$ e diferentes intervalos de manutenção e eficácias de manutenção



Fonte: O autor (2019)

Visualmente, é possível notar nas Figuras Figura 24, Figura 25 e Figura 26 que a PFD do componente vai aumentando ao longo do tempo e reduz sempre que uma manutenção é realizada, embora isso ocorra em proporções diferentes entre os cenários apresentados. As diferenças imediatamente percebidas são:

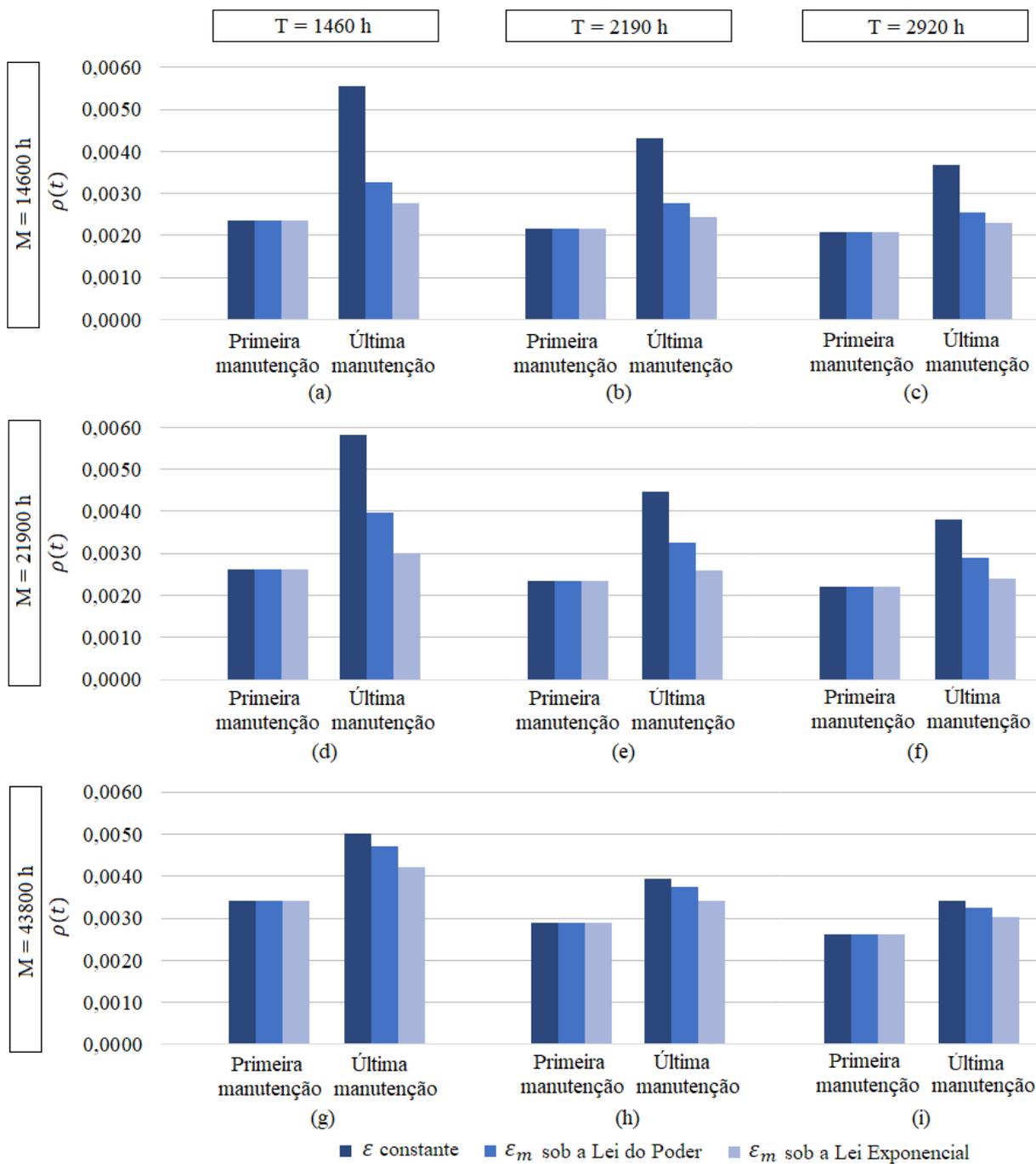
- As ações de manutenção reduzem a PFD do componente em maior proporção sob o modelo PAS, além de estabilizá-la após a realização de um determinado número de manutenções. Enquanto, no modelo PAR, a PFD, além de ser reduzida em menor proporção, não se estabiliza ao longo do tempo e continua a crescer;
- Em todos os cenários avaliados, os maiores valores de PFD ocorrem quando a eficácia da manutenção é constante, enquanto os menores valores são obtidos quando a eficácia ocorre sob MC de acordo com a Lei Exponencial;
- Sob a Lei do Poder, a eficácia da manutenção gera PFDs com valores intermediários entre os obtidos pela eficácia constante e sob a Lei Exponencial;
- A PFD é proporcional a M e inversamente proporcional a T , de modo que seu valor é reduzido quando M diminui e T aumenta. Esta relação fica mais clara nas Figuras Figura 27 e Figura 28, que resumem bem o comportamento da PFD diante de todas essas variações em T , M e ε .

Sob os modelos PAR e PAS (Figuras Figura 27 e Figura 28), nota-se que após a primeira manutenção a PFD do componente é a mesma para os três tipos de eficácia de manutenção e reduz, proporcionalmente, à medida em que M diminui e T aumenta. Contudo, após a última manutenção, a PFD apresenta valores distintos para cada tipo de eficácia de manutenção.

A última manutenção nos gráficos (a), (b) e (c) ocorre na 7ª ação; em (d), (e) e (f) na 5ª ação; e em (g), (h) e (i) na 2ª ação, apresentando a menor PFD em (c) para eficácia da manutenção sob a Lei Exponencial. Isso mostra que, em um determinado período, quanto maior for o número de manutenções (com eficácia sob MC de acordo com a Lei Exponencial) e menor for o número de inspeções, menor será a PFD do componente. A razão para isto pode ser explicada pelo fato de que as ações de manutenção melhoram a condição do componente, gerando efeitos positivos sob sua condição operacional, enquanto as ações de inspeção, apesar de serem indispensáveis para detecção de falhas ocultas, degradam o componente a cada execução, gerando efeitos negativos sob sua condição.

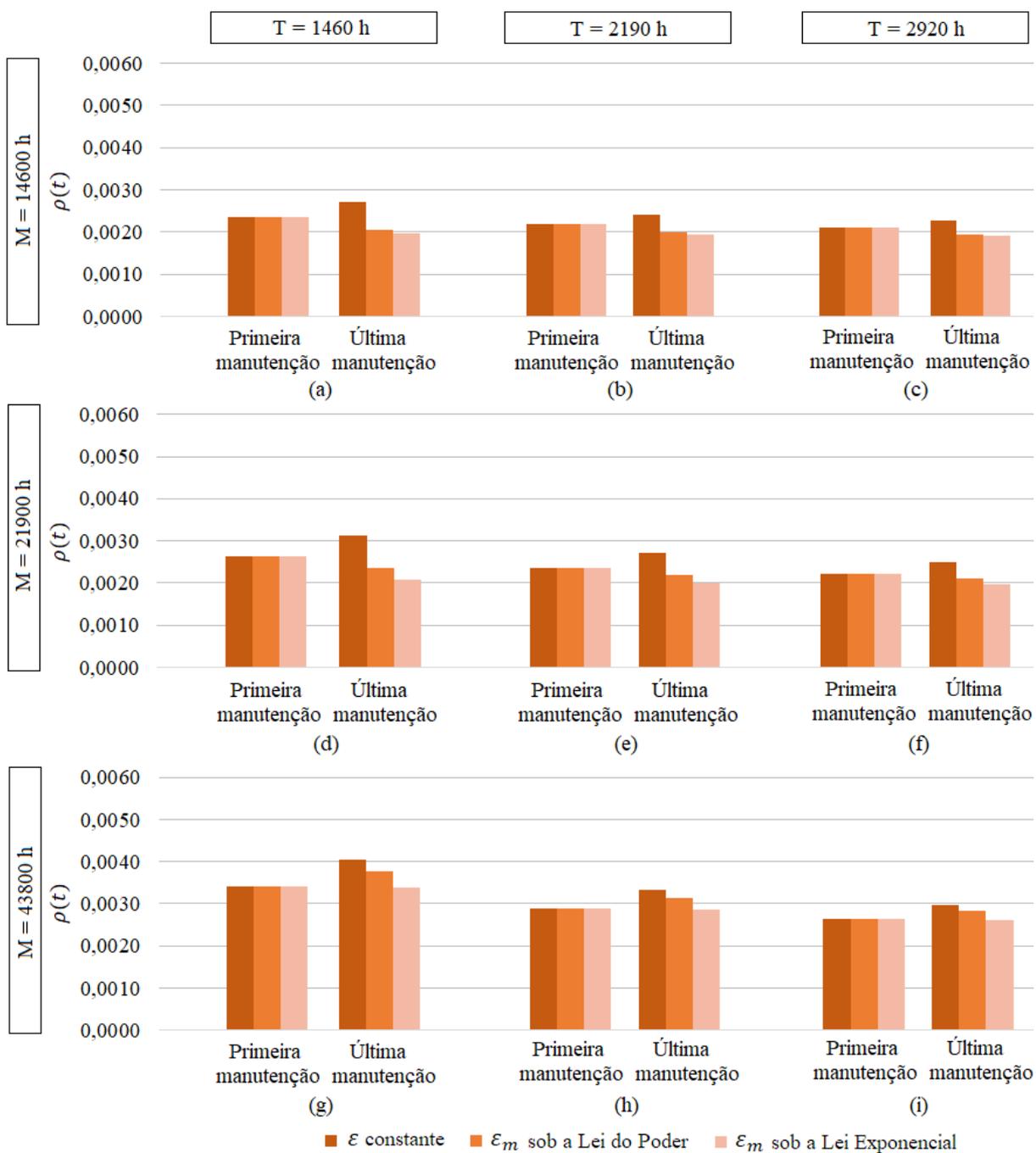
Portanto, de acordo com os pontos observados nesta análise, verificou-se que assumir práticas de MC sob as ações de manutenções pode reduzir consideravelmente a \bar{u}_{TOTAL} em razão de atuar diretamente sob a não confiabilidade do componente, tida como a causa raiz do problema.

Figura 27 – PFD do componente após a primeira e última manutenção sob o Modelo PAR para diferentes M , T e eficácia de manutenção



Fonte: O autor (2019)

Figura 28 – PFD do componente após a primeira e última manutenção sob o Modelo PAS para diferentes M , T e eficácia de manutenção



Fonte: O autor (2019)

Apesar das variáveis de decisão deste modelo serem o intervalo de inspeção (T) e o número de manutenções (m) para um período de renovação L , identificou-se, através desta análise, que a eficácia das ações de manutenção impacta diretamente a Não confiabilidade do componente. Desse modo, é importante avaliar a PFD e a \bar{u}_{TOTAL} do componente quando as ações de manutenção são realizadas sob diferentes eficácias, pois, dessa forma, é possível

enxergar uma nova maneira de reduzir a PFD e, conseqüentemente, a \bar{u}_{TOTAL} do componente sem precisar alterar as políticas de inspeção e manutenção.

As próximas análises foram realizadas, portanto, para mostrar o impacto da eficácia da manutenção na PFD e na \bar{u}_{TOTAL} do componente, com o objetivo de ampliar a visão do(s) decisor(es) através de novas informações sobre pontos relevantes, que muitas vezes não são discutidos nas tomadas de decisão.

5.1.4 Análise 4: Comportamento da Não confiabilidade após ações de manutenção sob diferentes eficácias

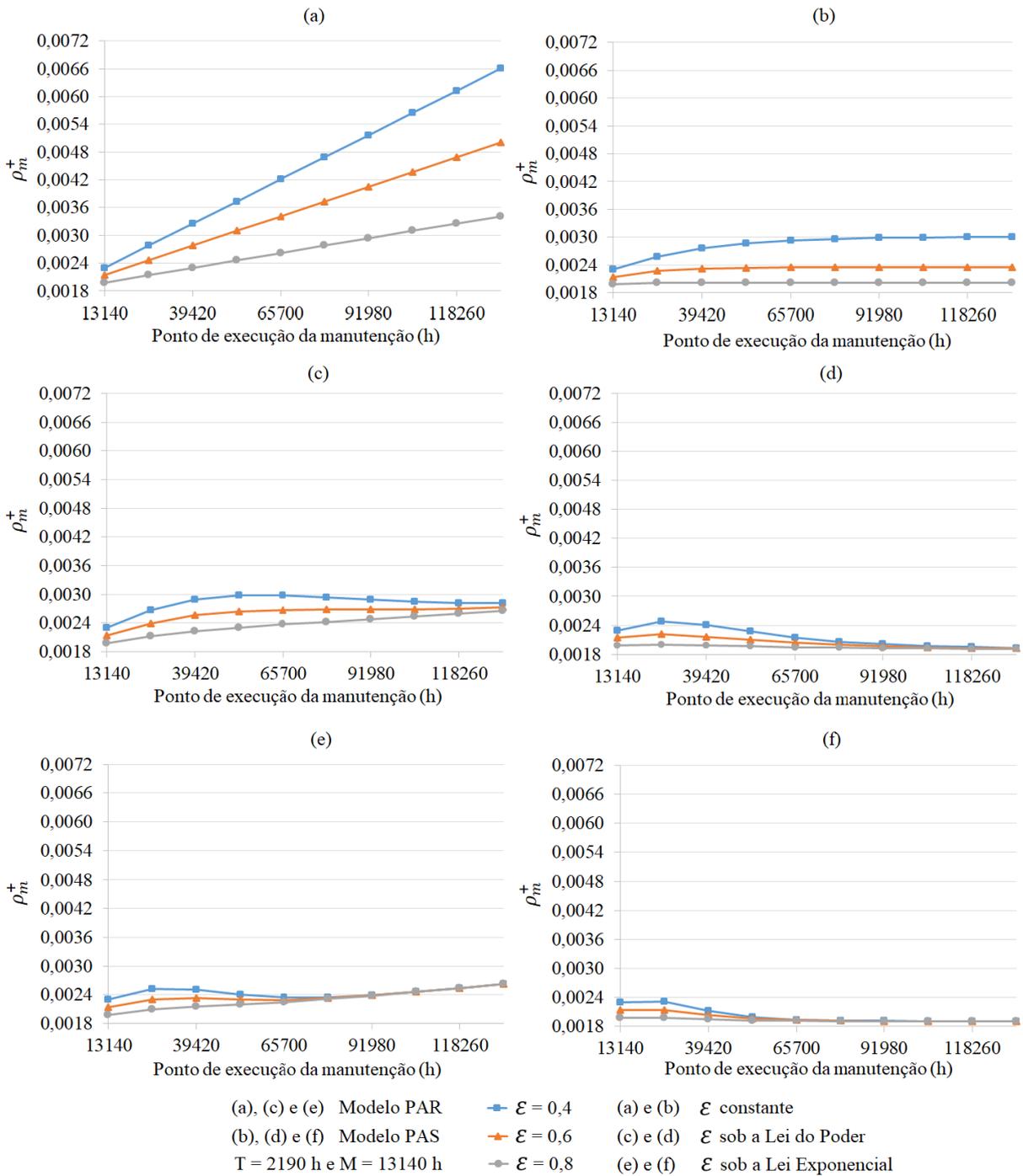
Esta análise foi realizada com o intuito de mostrar o impacto das ações de manutenção na PFD do componente quando elas ocorrem sob diferentes eficácias. A Figura 29 mostra a variação da PFD do componente imediatamente após uma ação de manutenção, para os modelos PAR e PAS, em três cenários distintos, onde a manutenção ocorre sob um tipo diferente de eficácia. O modelo PAR é representado pelos gráficos (a), (c) e (e) e o modelo PAS pelos gráficos (b), (d) e (f). No primeiro cenário, (a) e (b), as ações de manutenção ocorrem sob uma eficácia constante, no segundo cenário, (c) e (d), sob MC de acordo com a Lei do Poder, e no terceiro cenário, (e) e (f), sob MC de acordo com a Lei Exponencial. Em todos os gráficos da Figura 29, a linha azul mostra o comportamento da PFD quando a primeira manutenção ocorre com eficácia de 0,4; a linha laranja quando ocorre com eficácia 0,6; e a linha cinza quando ocorre com eficácia 0,8.

Analisando os resultados mostrados na Figura 29, para o modelo PAR, notou-se que quando a eficácia da manutenção é constante a PFD do componente cresce continuamente a medida em que as ações de manutenção vão sendo executadas, como mostra o gráfico (a). No entanto, ao assumir práticas de melhoria contínua, gráficos (c) e (e), a PFD passa a apresentar valores consideravelmente menores, pois como a eficácia da manutenção aumenta a cada nova ação realizada, o volume da degradação presente no componente é reduzido em maior proporção. Nos gráficos (a), (c) e (e), por exemplo, quando a eficácia inicial é 0,4 percebe-se que após a 10ª manutenção (em 131400h) a PFD do componente é de 0,0066, em (a); 0,0028, em (c); e 0,0026, em (e); mostrando, com isso, uma redução de 57,58% na PFD do componente quando a eficácia da manutenção passa a ocorrer sob MC, de acordo com a Lei do Poder, e de 60,61% quando a eficácia da manutenção passa a ocorrer sob MC, de acordo com a Lei Exponencial.

Já para o modelo PAS quando a eficácia da manutenção é constante, gráfico (b), a PFD também cresce à medida em que as ações de manutenção vão sendo executadas, porém com uma proporção bem menor que no modelo PAR. Além disso, nota-se que, após um

determinado número de manutenções, a PFD se estabilizada. Essa estabilidade é vista com maior clareza no gráfico (f), onde a PFD passa a apresentar valores com uma variação extremamente pequena a partir da 6ª manutenção.

Figura 29 – PFD do componente imediatamente após ação de manutenção para diferentes Eficácias



Fonte: O autor (2019)

5.1.5 Análise 5: Indisponibilidade total média em um período de renovação para diferentes eficácias iniciais e números de manutenções em L

Esta análise foi realizada com o objetivo de mostrar o que ocorre com \bar{u}_{TOTAL} quando mais ações de manutenção são realizadas sob diferentes eficácias iniciais (eficácia da primeira manutenção). A Figura 30 apresenta os resultados desta análise sob três cenários para o modelo PAR (gráficos (a), (c) e (e)); e para o modelo PAS (gráficos (b), (d) e (f)). Em (a) e (b), as manutenções ocorrem sem MC; em (c) e (d), ocorrem sob MC pela Lei do Poder; e em (e) e (f), ocorrem sob MC pela Lei Exponencial.

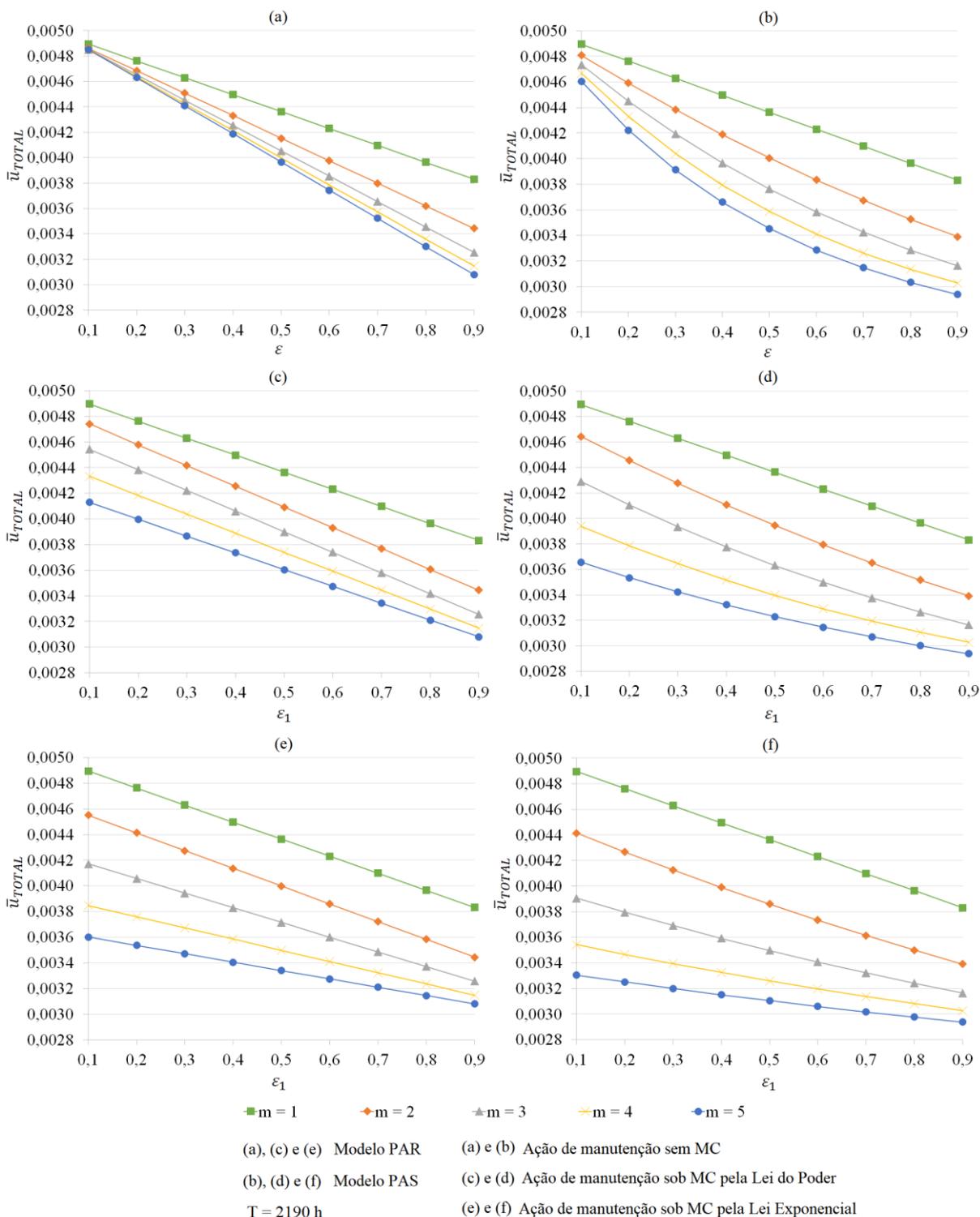
Em todos os gráficos da Figura 30 foi assumido que as inspeções são realizadas em intervalos de 2190 horas e cada linha representa uma quantidade específica de manutenções em um período de renovação L .

Os resultados da análise apontam que:

- Quando é realizada apenas uma manutenção durante o período de renovação do componente ($m=1$), o valor de \bar{u}_{TOTAL} se mantém o mesmo, tanto para eficácias constantes quanto para eficácias sob MC. Isso ocorre em razão das ações de manutenção sob MC obterem melhorias apenas a partir da segunda ação.
- Quando são realizadas mais de uma manutenção ($m > 1$), o valor de \bar{u}_{TOTAL} é reduzido nos três casos, porém com maior proporção sob MC, onde a redução obtida pela eficácia sob Lei Exponencial > eficácia sob Lei do Poder > eficácia constante.
- Quando a primeira manutenção ocorre com eficácia 0,9, o valor de \bar{u}_{TOTAL} passa a ser o mesmo para os três casos, independentemente do número de manutenções realizadas durante o período de renovação do componente. Isso ocorre devido $\varepsilon_1 = \varepsilon^* = 0,9$, o que significa que a primeira manutenção já é realizada com a eficácia ótima estabelecida e, portanto, não há mais o que ser melhorado nas próximas manutenções.

Em geral, tanto no modelo PAR quanto no modelo PAS, a \bar{u}_{TOTAL} diminui quando a eficácia da primeira manutenção aumenta, embora isso ocorra em maior proporção no modelo PAS. Além disso, quando são realizadas mais manutenções em um período L (ou seja, quando m aumenta) a \bar{u}_{TOTAL} apresenta uma redução maior nos cenários onde a manutenção atua sob MC (gráficos (c), (d), (e) e (f)).

Figura 30 – Indisponibilidade total média de um período de renovação para diferentes eficácias iniciais e números de manutenção em L



Fonte: O autor (2019)

5.1.6 Análise 6: Indisponibilidade total média em um período de renovação para diferentes eficácias iniciais e números de manutenções em L , sob Efeito de Segurança

Esta análise foi realizada para avaliar a \bar{u}_{TOTAL} em casos onde é exigida uma disponibilidade mínima do componente até sua renovação. Para isto, foi adicionada uma restrição de indisponibilidade máxima, \bar{u}_{TOTAL}^{max} , aos cenários apresentados na Análise 5. O intuito é indicar uma nova estratégia a respeito do que pode ser feito pelo(s) decisor(es) para atender a restrição \bar{u}_{TOTAL}^{max} sem precisar alterar as variáveis de decisão. A restrição \bar{u}_{TOTAL}^{max} foi estabelecida considerando uma situação hipotética onde é exigido que o componente esteja disponível em, pelo menos, 96,6% do período L . Dessa forma, para atender a disponibilidade requerida, de 96,6%, a \bar{u}_{TOTAL} não pode ultrapassar o valor de 0,0040 durante o período L .

Os resultados desta análise são apresentados na Figura 31, onde é possível notar que ao limitar a \bar{u}_{TOTAL} em no máximo 0,0040 algumas políticas de manutenção só podem ser adotadas se forem executadas a partir de determinadas eficácias iniciais.

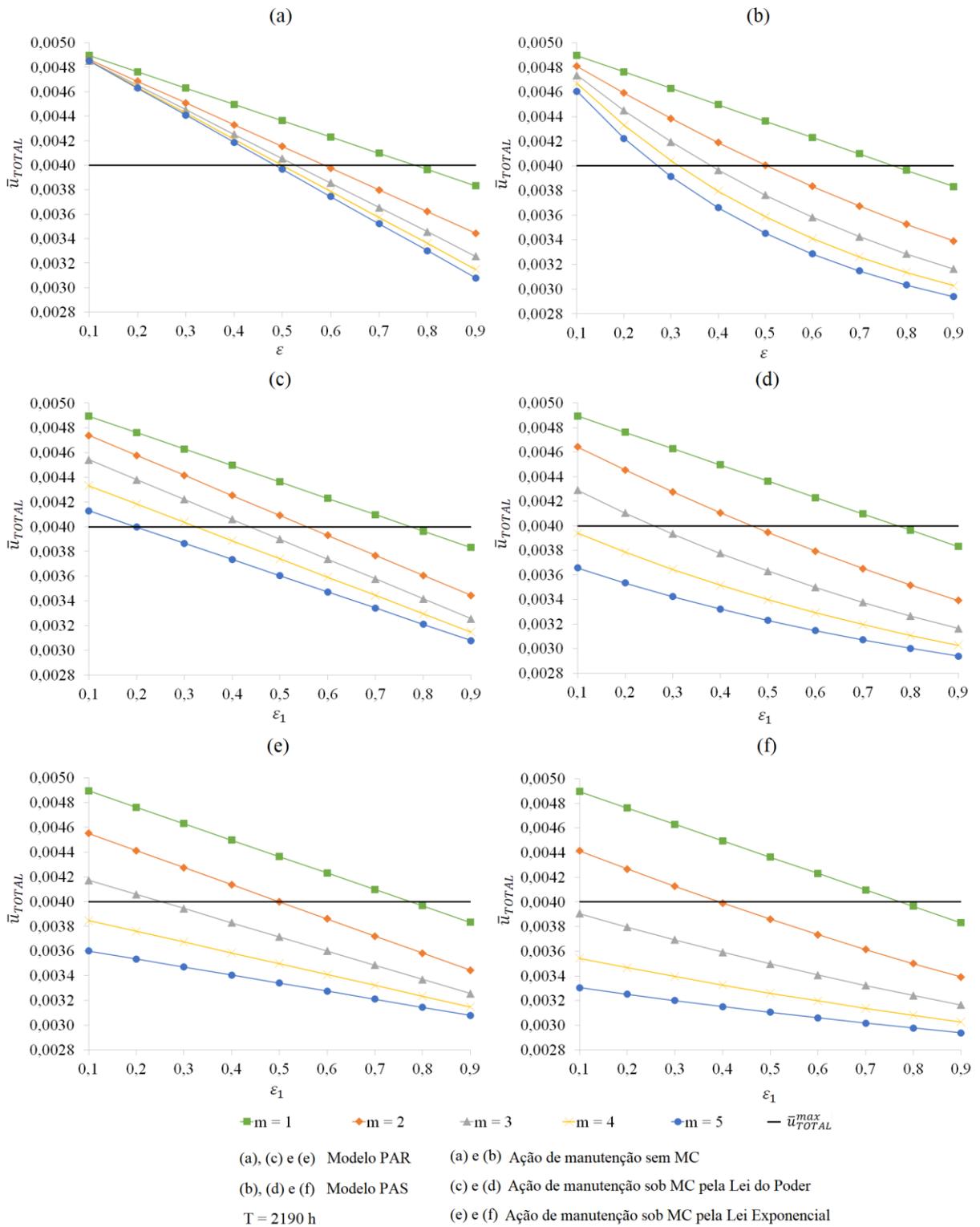
A Tabela 12 indica os valores mínimos que a eficácia inicial da manutenção precisa ter para atender a restrição de \bar{u}_{TOTAL}^{max} , caso o(s) decisor(es) deseje(m) manter uma das política de manutenção avaliadas ($m=1$, $m=2$, $m=3$, $m=4$ ou $m=5$). Para manter a política de manutenção $m=1$, em todos os cenários, a primeira manutenção precisaria iniciar com eficácia de, pelo menos, 0,8. Para manter $m=2$, seria necessária executar a primeira manutenção com eficácia de, no mínimo, 0,6 em (a) e (c); 0,5 em (b), (d) e (e); e 0,4 em (f). Para manter $m=3$, a eficácia da primeira manutenção precisaria ser, pelo menos, 0,6 em (a); 0,5 em (c); 0,4 em (b); 0,3 em (d) e (e); e 0,1 em (f). Para manter $m=4$, seria necessário realizar uma eficácia inicial de manutenção de, no mínimo, 0,5 em (a); 0,4 em (b) e (c); e 0,1 em (d), (e) e (f). Por fim, para manter $m=5$ seria necessário realizar a primeira manutenção com eficácia de, no mínimo, 0,5 em (a); 0,3 em (b); 0,2 em (c); e 0,1 em (d), (e) e (f).

Tabela 12 – Eficácia inicial de manutenção mínima necessária para atender a restrição \bar{u}_{TOTAL}^{max}

Eficácia inicial da manutenção	Gráficos	Número de manutenções em um período de renovação L				
		$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
Constante	(a)	0,8	0,6	0,6	0,5	0,5
	(b)	0,8	0,5	0,4	0,4	0,3
Sob MC pela Lei do poder	(c)	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2
	(d)	0,8	0,5	0,3	0,1	0,1
Sob MC pela Lei Exponencial	(e)	0,8	0,5	0,3	0,1	0,1
	(f)	0,8	0,4	0,1	0,1	0,1

Fonte: O autor (2019)

Figura 31 – Indisponibilidade total média de um período de renovação para diferentes eficácias iniciais e números de manutenções em L, sob Efeito de Segurança



Fonte: O autor (2019)

Por meio desta última análise, fica evidente como a inclusão de uma restrição pode influenciar as decisões sobre as políticas de manutenção do componente. Além de ser comprovado, mais uma vez, que ao assumir práticas de MC sob as ações de manutenção os resultados obtidos tendem a ser os melhores.

5.1.7 Análise de sensibilidade para o Modelo 1

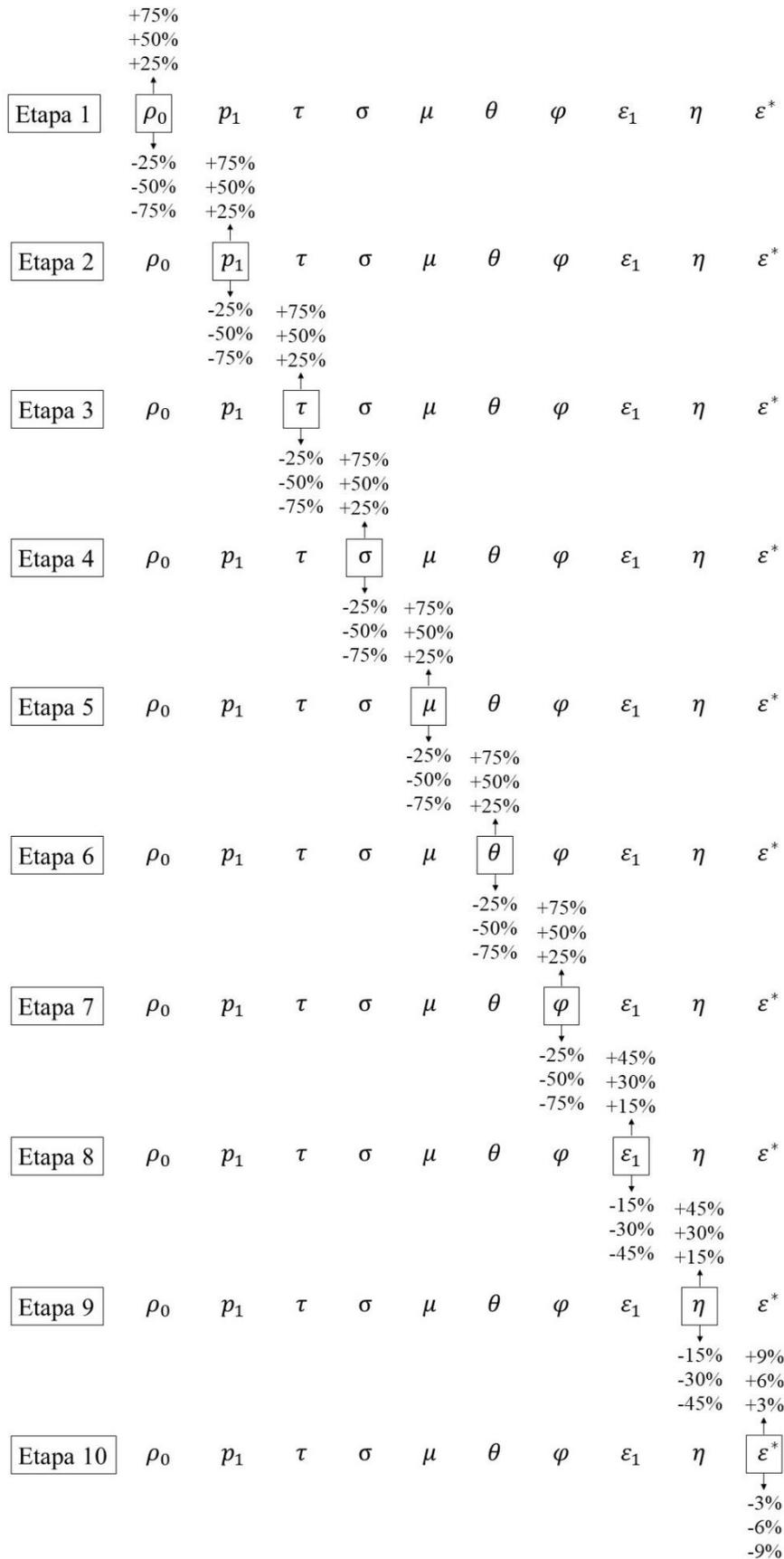
Esta análise de sensibilidade foi realizada através da comparação entre os resultados da aplicação numérica e os demais cenários obtidos das variações submetidas aos parâmetros do Modelo 1. O objetivo foi verificar se o modelo se comportaria como esperado em todos os cenários avaliados, para que, com isso, pudesse ser validado.

A análise foi dividida em 10 etapas, como mostrado na Figura 32, onde:

1. Em cada etapa, um único parâmetro foi variado enquanto os demais permaneceram com seus valores inalterados.
2. Cada parâmetro foi submetido a três variações acima e abaixo do seu valor, totalizando seis variações por parâmetro;
3. Cada variação resultou em um cenário composto pela indisponibilidade total média do componente em um período de renovação, \bar{u}_{TOTAL} , para diferentes valores de T e m .
4. Todas as variações foram realizadas para os modelos PAR e PAS, considerando a melhoria contínua das ações de manutenção tanto sob a Lei do Poder quanto sob a Lei Exponencial.

Ao todo, foram gerados 240 cenários, dos quais 60 são correspondentes ao modelo PAR/Lei do Poder; 60 ao modelo PAS/Lei do Poder; 60 ao modelo PAR/Lei Exponencial; e 60 ao modelo PAS/Lei Exponencial.

Figura 32 – Percentual de variações submetidas aos parâmetros do Modelo 1 para análise de sensibilidade



Fonte: O autor (2019)

As porcentagens de variação de cada parâmetro, mostradas na Figura 32, foram definidas de acordo com suas respectivas limitações. Em especial, os parâmetros ε_1 , η e ε^* receberam variações diferentes dos demais em razão de seus valores terem restrições de variação bem definidas. A eficácia da primeira manutenção, ε_1 , e a eficiência das ações de inspeção, η , só poderiam receber variações que resultassem em valores acima de 0 e abaixo de 1, enquanto a eficácia ótima de manutenção, ε^* , só poderia receber variações que resultassem em valores igual ou acima de 0,6 e abaixo de 1, pois como $\varepsilon_1 = 0,6$, se ε^* fosse menor que esse valor não haveria melhoria a ser feita no processo de manutenção. Por outro lado, ε^* não poderia ser igual a 1, pois as ações de manutenção, neste modelo, são consideradas imperfeitas.

Os valores correspondentes as variações submetidas a cada parâmetro são apresentados na Tabela 13, e a descrição do comportamento esperado para \bar{u}_{TOTAL} , após cada variação, na Tabela 14.

Tabela 13 – Valores das variações submetidas aos parâmetros do Modelo 1 para análise de sensibilidade

Parâmetros	Variações submetidas abaixo do valor da aplicação numérica			Valor da aplicação numérica	Variações submetidas acima do valor da aplicação numérica		
ρ_0	0,00046	0,00091	0,001365	0,00182	0,00228	0,00273	0,00319
p_1	0,01825	0,0365	0,05475	0,073	0,09125	0,1095	0,12775
τ	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
σ	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
μ	0,65	1,3	1,95	2,6	3,25	3,9	4,55
θ	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
φ	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
ε_1	0,33	0,42	0,51	0,6	0,69	0,78	0,87
η	0,33	0,42	0,51	0,6	0,69	0,78	0,87
ε^*	0,819	0,846	0,873	0,9	0,927	0,954	0,981

Fonte: O autor (2019)

Tabela 14 – Descrição do comportamento esperado pelo Modelo 1 após cada variação

Parâmetros	Comportamento esperado
ρ_0	Este parâmetro representa a PFD inicial do componente, logo espera-se que quanto maior for seu valor, maior será \bar{u}_{TOTAL} .
p_1	Este parâmetro representa a degradação sofrida pelo componente todas as vezes em que é demandado. Portanto, espera-se que quanto maior for seu valor, maior será \bar{u}_{TOTAL} .

τ, σ, μ e θ	Estes parâmetros indicam o tempo levado para realizar, respectivamente, uma ação de inspeção, uma ação de manutenção preventiva, uma ação de manutenção corretiva e uma ação de renovação. Durante estas ações, o componente fica indisponível, logo é esperado que quanto maior forem seus valores, maior será \bar{u}_{TOTAL} .
φ	Este parâmetro representa a melhoria obtida pelas ações de manutenção a cada nova ação realizada. Quando φ aumenta significa que as ações de manutenção estão ficando mais eficazes e proporcionando uma redução maior na degradação do componente. Logo, espera-se que quanto maior for seu valor, menor será \bar{u}_{TOTAL} .
ε_1	Este parâmetro representa a eficácia da primeira ação de manutenção. Logo, espera-se que quanto maior for seu valor, menor será \bar{u}_{TOTAL} .
η	Este parâmetro representa a eficiência das ações de inspeção. Dessa forma, quando uma inspeção é realizada com uma eficiência alta, as chances de detectar uma falha oculta são maiores, consequentemente, são realizadas mais ações de manutenção corretiva e, com isso, o componente permanece indisponível por mais tempo. Então, espera-se que quanto maior for o valor de η , maior será \bar{u}_{TOTAL} .
ε^*	Este parâmetro representa a eficácia máxima que as ações de manutenção podem atingir. É compreendido como uma meta a ser alcançada. Portanto, valores altos de ε^* exigem que as taxas de melhoria em cada manutenção sejam maiores para que a meta estabelecida seja alcançada, o que faz com que os valores esperados de \bar{u}_{TOTAL} sejam menores.

Fonte: O autor (2019)

As Figuras Figura 33 e Figura 34 mostram os resultados obtidos para cada variação submetida aos parâmetros do Modelo 1, considerando $m=3$ e $T=4380h$, tanto para a eficácia da manutenção sob a Lei do Poder (Figura 33) quanto para eficácia da manutenção sob a Lei Exponencial (Figura 34). Em ambas as figuras, nota-se que existem parâmetros mais sensíveis que outros, onde uma pequena variação já é suficiente para alterar significativamente seu valor. No entanto, embora alguns parâmetros tenham se mostrado pouco sensíveis às variações, como η e μ , seus valores também corresponderam ao comportamento esperado.

Figura 33 – Resultado da análise de sensibilidade considerando a eficácia de manutenção sob a Lei do Poder para $m=3$ e $T=4380$



Fonte: O autor (2019)

Figura 34 – Resultado da análise de sensibilidade considerando a eficácia de manutenção sob a Lei Exponencial para $m=3$ e $T=4380$



Fonte: O autor (2019)

Com os resultados apresentados nas Figuras Figura 33 e Figura 34, verificou-se que o Modelo 1 se comportou como esperado, mostrando robustez e coerência diante dos resultados gerados em cada variação. Com isso, a proposta do Modelo 1 torna-se uma alternativa interessante para que gestores de manutenção possam melhorar os processos decisórios sobre as políticas de inspeção e manutenção de componentes de segurança sujeitos a falha oculta.

5.1.8 Implicações gerenciais do Modelo 1

A decisão sobre as políticas de inspeção e manutenção de componentes de segurança pode implicar em consequências diversificadas para uma organização. Ter uma visão global das implicações gerenciais que podem ser geradas a partir de uma decisão é fundamental para que os gestores de manutenção possam estruturar melhor o plano de ação. O modelo proposto visa auxiliar esses gestores a definir as políticas de inspeção e manutenção de componentes de segurança, assumindo práticas de melhoria contínua sobre as ações de manutenção e uma restrição de indisponibilidade para casos especiais.

As implicações gerenciais do modelo são apresentadas sobre diferentes perspectivas, como por meio da utilização de modelos de indisponibilidade do tipo PAR e PAS; e pela adoção de práticas de melhoria contínua sob duas funções: Lei do Poder e Lei Exponencial.

De modo geral, em todas as análises os resultados apontam que, à curto prazo, os modelos PAR e PAS apresentam valores semelhantes, no entanto, a medida em que novas ações de manutenção vão sendo realizadas, o modelo PAS passa a apresentar valores melhores do que o modelo PAR, sobressaindo-se a médio ou longo prazo. Neste sentido, em casos onde a vida útil do componente é curta ambos os modelos poderiam ser utilizados para estimar o estado do componente após as ações de manutenção, contudo, quando sua vida útil é longa, recomenda-se o uso de modelos do tipo PAS.

Os melhores resultados ocorrem quando são adotados grandes intervalos de inspeção, pequenos intervalos de manutenção e práticas de melhoria contínua sobre as ações de manutenção. Isso sugere que os gestores estabeleçam menos inspeções, mais manutenções e busquem meios para eliminar as ineficiências das ações de manutenção.

Os resultados também apontaram que quanto menor for a eficácia inicial da manutenção mais ações de manutenção serão necessárias para que a eficácia ótima seja alcançada. Assim, recomenda-se evitar iniciar as ações de manutenção com uma eficácia baixa, pois, nestes casos, os esforços serão maiores para que os resultados desejados sejam obtidos.

Por fim, em casos onde há restrições a respeito do nível máximo de indisponibilidade aceitável, o controle sobre a condição do componente passa a ser mais rigoroso, visto que sua

indisponibilidade não pode ultrapassar o limite estabelecido. Neste sentido, o modelo torna-se uma ferramenta de grande importância para os gestores, por fornecer a estimativa de indisponibilidade do componente após m manutenções, o que facilita sua tomada de decisão por poder realizar diversas simulações e, com isso, visualizar a melhor alternativa para manter a indisponibilidade do componente abaixo do limite máximo permitido.

5.2 Aplicação Numérica para o Modelo 2

Nesta seção, uma aplicação numérica é realizada para ilustrar o Modelo 2 (Modelo Multicritério), onde 75 alternativas (x_i) foram avaliadas para os quatro critérios considerados no modelo, assumindo $SS > CT > RO > MA$ como a ordem de preferência dos critérios e os seguintes dados de entrada (Tabela 15):

Tabela 15 – Dados de entrada para aplicação do Modelo 2

Parâmetro	Valor	Unidade de medida
α	10.000	-
β	3	-
C_i	10	\$/inspeção
C_r	100	\$/reparo
C_o	100	\$/inatividade
C_{Res}	1.000	\$/restauração
C_A	1.000.000	\$/acidente
φ	0,000001	demandas/hora
T_i	0,2	horas/inspeção
T_r	0,7	horas/reparo
CRI_{SS}	9	-
CRI_A	4	-
CRI_{RO}	7	-

Fonte: Adaptado de Ahmadi e Kumar (2011)

Esses dados foram considerados com o objetivo de analisar o problema de decisão apresentado por Ahmadi e Kumar (2011), com uma perspectiva diferente, em que os critérios Meio Ambiente, Saúde e Segurança e Recuperação Operacional são considerados.

A Tabela 16 mostra a matriz de consequências para os critérios, com os valores gerados a partir das Equações (4.24), (4.25), (4.26) e (4.27).

Tabela 16 – Matriz de consequências dos critérios

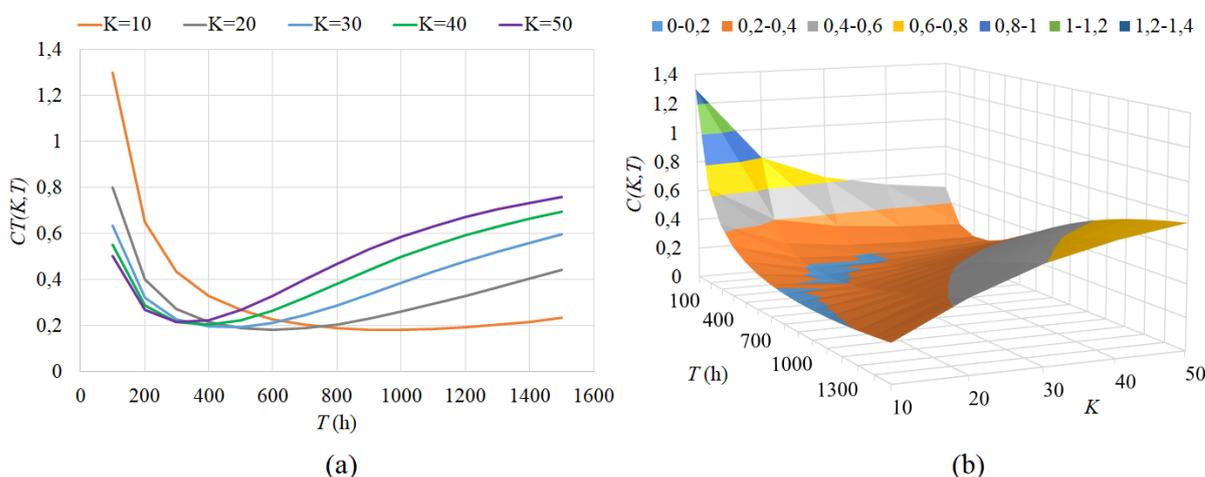
Alternativas							Critérios						Alternativas							Critérios							
x_i	K	T	CT	SS	MA	RO	x_i	K	T	CT	SS	MA	RO	x_i	K	T	CT	SS	MA	RO	x_i	K	T	CT	SS	MA	RO
x_1	10	100	1,300	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	x_{39}	30	900	0,336	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$														
x_2	10	200	0,651	$6,8 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	x_{40}	30	1000	0,385	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$														
x_3	10	300	0,435	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	x_{41}	30	1100	0,434	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$														
x_4	10	400	0,329	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$	x_{42}	30	1200	0,480	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$														
x_5	10	500	0,268	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	x_{43}	30	1300	0,523	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$														
x_6	10	600	0,230	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$	x_{44}	30	1400	0,561	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$														
x_7	10	700	0,205	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	x_{45}	30	1500	0,596	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$														
x_8	10	800	0,191	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	x_{46}	40	100	0,552	$7,1 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$														
x_9	10	900	0,184	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	x_{47}	40	200	0,286	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$8,8 \cdot 10^{-6}$														
x_{10}	10	1000	0,182	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	x_{48}	40	300	0,215	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$														
x_{11}	10	1100	0,185	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	x_{49}	40	400	0,204	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$														
x_{12}	10	1200	0,193	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	x_{50}	40	500	0,225	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$														
x_{13}	10	1300	0,203	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$	x_{51}	40	600	0,267	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$														
x_{14}	10	1400	0,217	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	x_{52}	40	700	0,322	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$														
x_{15}	10	1500	0,234	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	x_{53}	40	800	0,382	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$														
x_{16}	20	100	0,801	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	x_{54}	40	900	0,442	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$														
x_{17}	20	200	0,403	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	x_{55}	40	1000	0,498	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$														
x_{18}	20	300	0,275	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	x_{56}	40	1100	0,548	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$														
x_{19}	20	400	0,217	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	x_{57}	40	1200	0,592	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$														
x_{20}	20	500	0,191	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$	x_{58}	40	1300	0,631	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$														
x_{21}	20	600	0,184	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	x_{59}	40	1400	0,665	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$														
x_{22}	20	700	0,190	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	x_{60}	40	1500	0,694	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$														
x_{23}	20	800	0,206	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	x_{61}	50	100	0,503	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$8,7 \cdot 10^{-7}$														
x_{24}	20	900	0,230	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	x_{62}	50	200	0,268	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$														
x_{25}	20	1000	0,260	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	x_{63}	50	300	0,216	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$														
x_{26}	20	1100	0,294	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	x_{64}	50	400	0,225	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$														
x_{27}	20	1200	0,331	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	x_{65}	50	500	0,269	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$														
x_{28}	20	1300	0,368	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	x_{66}	50	600	0,331	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$														
x_{29}	20	1400	0,405	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	x_{67}	50	700	0,401	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$														
x_{30}	20	1500	0,441	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	x_{68}	50	800	0,470	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$														
x_{31}	30	100	0,634	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	x_{69}	50	900	0,532	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$														
x_{32}	30	200	0,323	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	x_{70}	50	1000	0,586	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$														
x_{33}	30	300	0,229	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	x_{71}	50	1100	0,633	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$														
x_{34}	30	400	0,197	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$7,7 \cdot 10^{-5}$	x_{72}	50	1200	0,672	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$														
x_{35}	30	500	0,195	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	x_{73}	50	1300	0,706	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$														
x_{36}	30	600	0,213	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	x_{74}	50	1400	0,735	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$														
x_{37}	30	700	0,246	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	x_{75}	50	1500	0,760	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$														
x_{38}	30	800	0,288	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$																					

Fonte: O autor (2019)

A representação gráfica dos valores dos critérios contidos na Tabela 16 são apresentados a seguir pelas Figuras Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38.

A Figura 35 mostra o comportamento do CT em um ciclo de restauração para diferentes valores de K e T , com (a) demonstrando uma perspectiva do CT em 2D e (b) em 3D. Os resultados apontam que, dentre as alternativas avaliadas, o menor custo é obtido quando $K=10$ e $T=1000h$, resultando no valor de 0,182. Além disso, é possível notar graficamente que o custo tende a ser maior para políticas que adotam valores extremos de K e T (ou muito grandes ou muito pequenos). Enquanto o menor custo ocorre quando há um certo equilíbrio entre K e T (ou seja, se K for grande, T deve ser pequeno e vice-versa).

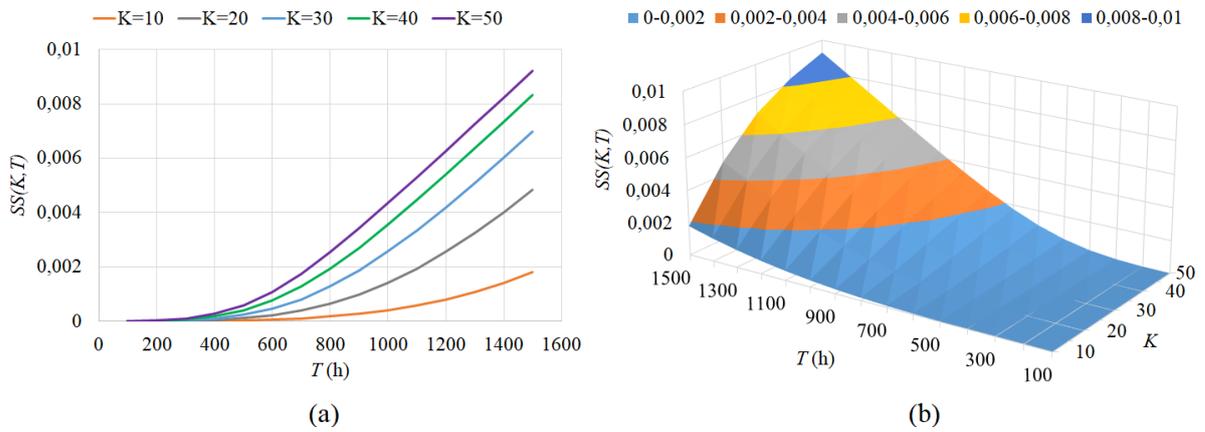
Figura 35 – Custo Total em um ciclo de restauração para diferentes valores de K e T



Fonte: O autor (2019)

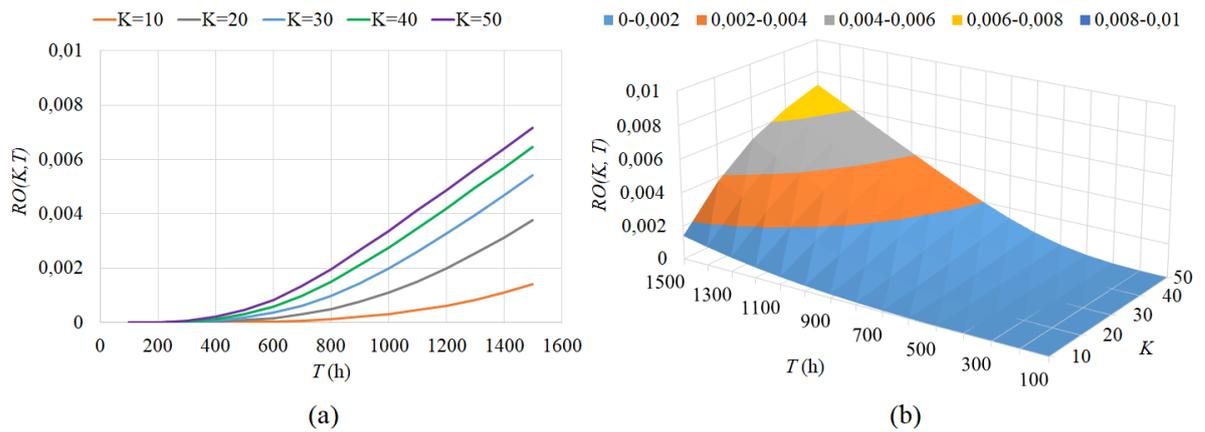
As Figuras Figura 36, Figura 37 e Figura 38 mostram o comportamento das Criticidade de SS , RO e MA , respectivamente, em um ciclo de restauração para diferentes valores de K e T , com (a) demonstrando uma perspectiva da criticidade em 2D e (b) em 3D. Dentre as alternativas avaliados, as menores criticidades foram obtidas nos três critérios para $K=10$ e $T=100h$, com valores de $4,27 \cdot 10^{-8}$ para SS ; $3,32 \cdot 10^{-8}$ para RO ; e $1,90 \cdot 10^{-8}$ para MA . Enquanto as maiores criticidades ocorreram nos três critérios pra $K=50$ e $T=1500h$. Isso mostra que as criticidades tendem a crescer quando são adotados valores maiores para K e T . Além disso, nota-se, pelos gráficos, que a criticidade de SS apresenta um crescimento mais ascendente que os critérios de RO e de MA . Isso é justificado devido os parâmetros $CRI_{SS} = 9$, $CRI_{RO} = 7$ e $CRI_A = 4$, que indicam a Saúde e Segurança como a área que sofreria as maiores consequências em caso de acidente.

Figura 36 – Criticidade de Saúde e Segurança em um ciclo de restauração para diferentes valores de K e T



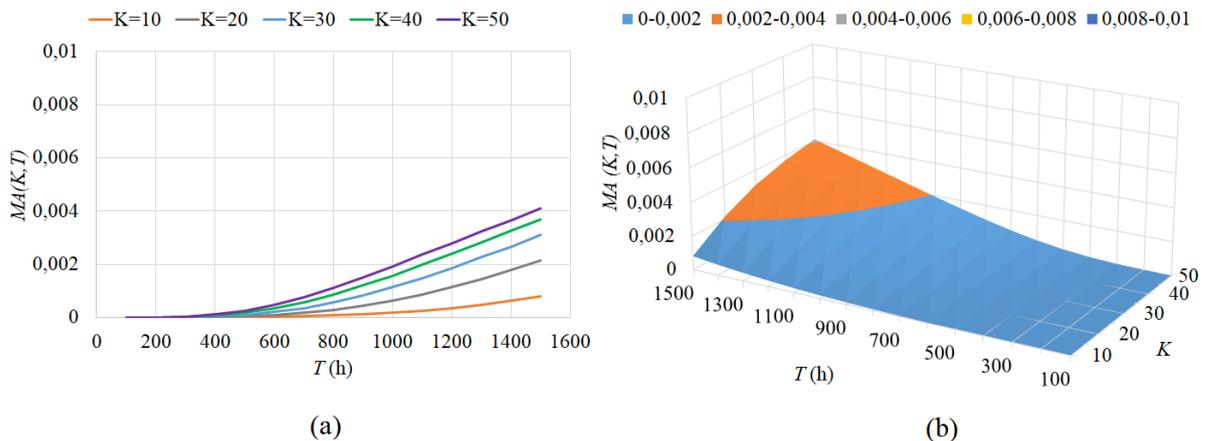
Fonte: O autor (2019)

Figura 37 – Criticidade de Recuperação Operacional em um ciclo de restauração para diferentes valores de K e T



Fonte: O autor (2019)

Figura 38 – Criticidade de Meio Ambiente em um ciclo de restauração para diferentes valores de K e T



Fonte: O autor (2019)

Com as análises realizadas, foi possível identificar que diferentes alternativas são indicadas como a melhor opção para definir a política de inspeção do sistema de proteção. Caso o decisor considere apenas o critério *CT* para tomar a decisão, x_{10} ($K=10$ e $T=1000h$) seria indicada como a melhor alternativa para política de inspeção, pois fornece o menor custo. No entanto, se for levado em consideração apenas os critérios *SS*, *MA* e *RO*, a alternativa x_1 ($K=10$ e $T=100h$) é a que seria indicada como a mais apropriada para a política, em razão de fornecer as menores criticidades para *SS*, *MA* e *RO*, simultaneamente.

Isso mostra o *tradeoff* existente no processo decisório, visto que escolher a alternativa x_{10} (realizar 10 inspeções com intervalos de 1000h) implicaria no menor custo, mas geraria criticidades relativamente altas para *SS*, *MA* e *RO*. Enquanto, escolher x_1 (realizar 10 inspeções com intervalos de 100h) resultaria nas menores criticidades para *SS*, *MA* e *RO*, porém acarretaria no maior custo. Em casos como este é difícil para um gestor de manutenção definir os valores de K e T para a política de inspeção, visto que sua escolha pode impactar positivamente alguns critérios e negativamente outros.

Aplicando o método SMAA-2 ao problema, obteve-se como resultado os índices de aceitabilidade de *rank*, b_i^r , e o vetor de peso central, w_i^c , das 75 alternativas avaliadas. A Tabela 17 apresenta os resultados gerados pelo método para as dez alternativas com melhor desempenho.

Tabela 17 – Resultados da aplicação do SMAA-2 considerando a ordem de preferência $SS > CT > RO > MA$

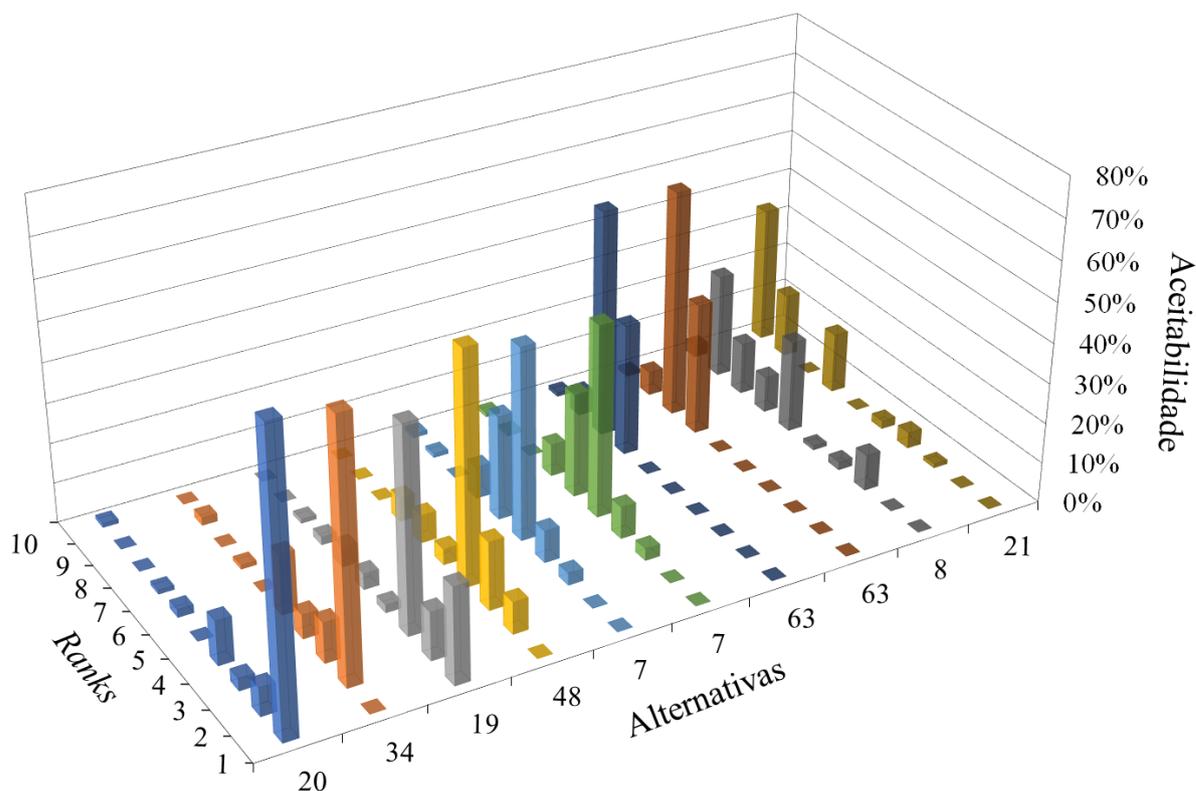
Rank	x_i	b^1	b^2	b^3	b^4	b^5	b^6	b^7	b^8	b^9	b^{10}	w^c
1	x_{20}	0,73	0,07	0,03	0,11	0	0,02	0,01	0	0	0,01	[0,46;0,31;0,16;0,07]
2	x_{34}	0	0,64	0,10	0,06	0,15	0	0,01	0	0,02	0	—
3	x_{19}	0,24	0,12	0,51	0,02	0,04	0,05	0,02	0,01	0	0	[0,64;0,18;0,12;0,06]
4	x_{48}	0	0,08	0,17	0,58	0,04	0,07	0,06	0	0	0	—
5	x_7	0	0	0,03	0,08	0,48	0,26	0,08	0	0,01	0,01	—
6	x_7	0	0	0,03	0,08	0,48	0,26	0,08	0	0,01	0,01	—
7	x_{63}	0	0	0	0	0	0	0,33	0,57	0,06	0,01	—
8	x_{63}	0	0	0	0	0	0	0,33	0,57	0,06	0,01	—
9	x_8	0	0	0,09	0,02	0,01	0,23	0,09	0,13	0,26	0,03	—
10	x_{21}	0	0	0,01	0,04	0,02	0	0,15	0	0,16	0,34	—

Fonte: O autor (2019)

Os resultados da Tabela 17 mostram que a alternativa x_{20} ($K=20$ e $T=500h$) é a que apresenta o maior índice de aceitabilidade para o *rank* 1 quando os quatro critérios são

considerados, indicando que 73% do conjunto de pesos viáveis são favoráveis à x_{20} como a melhor alternativa. Por outro lado, a alternativa x_{10} (indicada como a melhor para o *CT*) foi posicionada no *rank* 21 com o maior índice de aceitabilidade para este *rank* (21%) e a alternativa x_1 (indicada como a melhor para *SS*, *RO* e *MA*) foi posicionada no *rank* 50 com o maior índice de aceitabilidade para este *rank* (13%). Dentre as alternativas mostradas na Tabela 17, apenas x_{19} e x_{20} possuem vetor de peso central e podem assumir o *rank* 1, caso o decisor adote o vetor de peso central correspondente. Para uma melhor visualização dos resultados da Tabela 17, a Figura 39 ilustra a aceitabilidades das dez alternativas com melhor desempenho, entre as 75 avaliadas.

Figura 39 – Aceitabilidade de rank das alternativas mais bem posicionadas no rank



Fonte: O autor (2019)

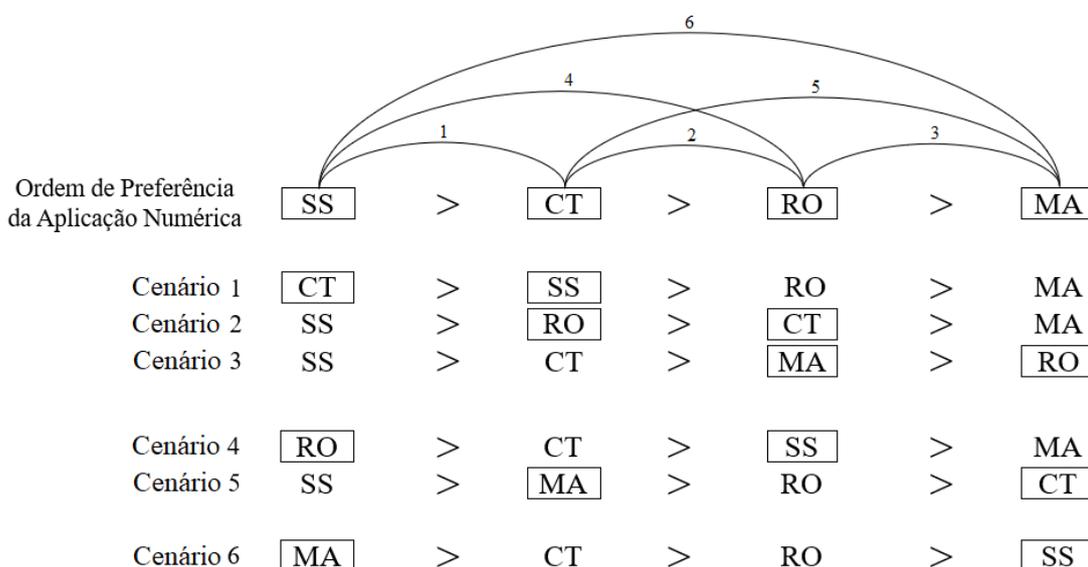
Considerando, portanto, os quatro critérios, podemos notar que a alternativa sugerida como a mais adequada para política de inspeção seria x_{20} (realizar 20 inspeções com intervalos de 500h) por apresentar o maior índice de aceitabilidade para o *rank* 1, atendendo satisfatoriamente a ordem de preferências assumida ao fornecer um equilíbrio entre os valores esperados para os critérios considerados, *CT*, *SS*, *MA* e *RO*.

5.2.1 Análise de sensibilidade para o Modelo 2

Para realizar a análise de sensibilidade deste modelo a ordem de preferência dos critérios assumida para aplicação numérica foi submetida a diferentes combinações, com o objetivo de avaliar todos os cenários possíveis a respeito das preferências de um decisor sobre os critérios *SS*, *CT*, *RO* e *MA*.

A Figura 40 mostra a ordem de preferência dos critérios assumida na aplicação numérica e todos os possíveis cenários gerados a partir das diferentes combinações dessa ordem. Ao todo, seis combinações diferentes foram geradas.

Figura 40 – Diferentes combinações submetidas a ordem de preferência dos critérios do Modelo 2 para análise de sensibilidade



Fonte: O autor (2019)

Os cenários 1, 2 e 3 resultaram da inversão de preferência dos critérios *SS* e *CT*, *CT* e *RO*, e *RO* e *MA*, respectivamente. Os cenários 4 e 5, foram obtidos pela inversão da preferência de *SS* e *RO*, e *CT* e *MA*, respectivamente. E o cenário 6 foi gerado pela inversão de preferência de *SS* e *MA*.

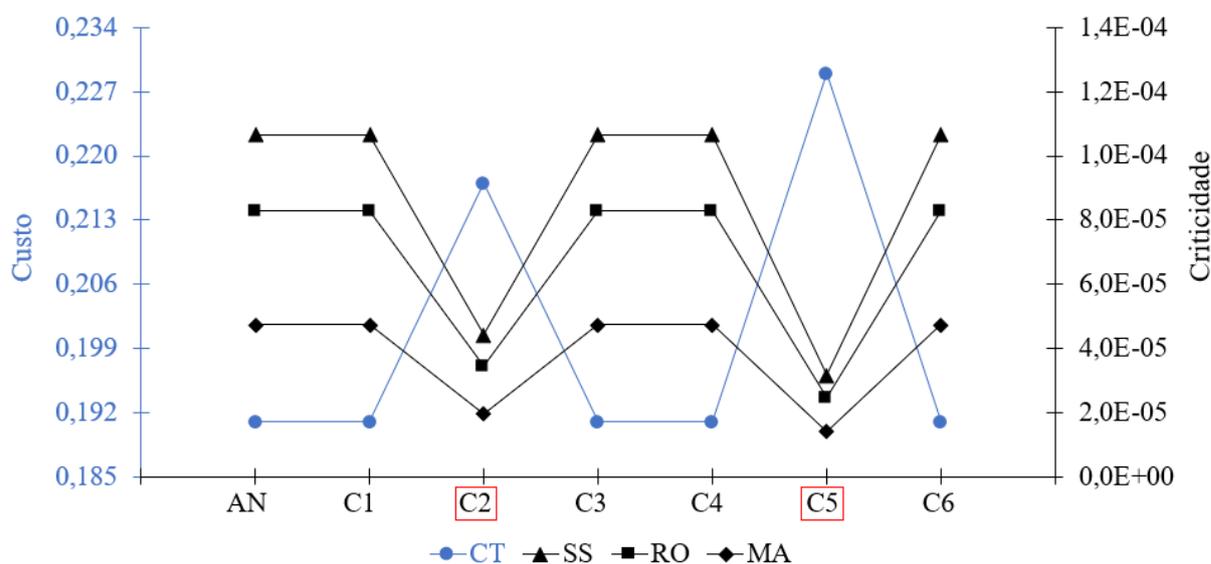
Após obter todas os possíveis cenários, o método SMAA-2 foi aplicado para cada um, considerando as mesmas alternativas avaliadas pela Aplicação Numérica (AN) do Modelo 2. As dez alternativas com o melhor desempenho, em cada cenário, são apresentadas na Tabela 18 e os valores resultantes para cada critério, considerando a alternativa com melhor desempenho em cada cenário, são apresentados na Figura 41.

Tabela 18 – Alternativas com melhor desempenho para cada cenário

Cenários	Preferência dos critérios	Rank 1	Rank 2	Rank 3	Rank 4	Rank 5	Rank 6	Rank 7	Rank 8	Rank 9	Rank 10
AN	SS > CT > RO > MA	20	34	19	48	7	7	63	63	8	21
C1	CT > SS > RO > MA	20	34	8	8	7	7	35	63	49	49
C2	SS > RO > CT > MA	19	33	48	20	34	6	7	63	62	18
C3	SS > CT > MA > RO	20	34	19	48	7	7	63	63	8	21
C4	RO > CT > SS > MA	20	34	19	48	7	7	63	63	8	21
C5	SS > MA > RO > CT	33	19	62	62	4	5	5	6	32	4
C6	MA > CT > RO > SS	20	34	19	48	7	7	63	63	8	21

Fonte: O autor (2019)

Figura 41 – Valores dos critérios considerando a alternativa com melhor desempenho em cada cenário



Fonte: O autor (2019)

De um modo geral, esta análise de sensibilidade mostrou que as dez alternativas com melhor desempenho em cada cenário geraram valores condizentes com sua posição no *rank* para os quatro critérios considerados no modelo.

Os resultados apresentados na Tabela 18 mostram que a alternativa com melhor desempenho na Aplicação Numérica (AN), alternativa 20, foi mantida nos demais cenários, exceto em C2 e C5, que indicaram, respectivamente, as alternativas 19 e 33 para o *rank* 1. A razão para esta mudança consiste no *tradeoff* existente entre os critérios de custo e criticidade. Ao analisar a Figura 41, por exemplo, nota-se que quando o CT é considerado o critério mais importante (C1) ou o 2º mais importante (C3, C4 e C6) a alternativa 20 permanece no *rank* 1, no entanto, ao considerá-lo menos importante (C2 e C5) novas

alternativas passam a ocupar o *rank 1* (alternativas 19 e 33), gerando maiores custos e menores criticidades para Saúde e Segurança (SS), Recuperação Operacional (RO) e Meio Ambiente (MA), o que condiz com a ordem de preferência estabelecida em C2 e C5.

Dessa forma, foi possível comprovar a robustez do Modelo 2 em razão de seus resultados expressarem coerência em situações com preferências de critério diversificadas, fortalecendo, com isso, a viabilidade de sua utilização em processos de decisão multicritério.

5.2.2 Implicações gerenciais do Modelo 2

A proposta deste modelo visa apoiar gestores de manutenção a tomar decisões em situações conflitantes em que mais de um critério precisa ser considerado para definir a política de inspeção de sistemas de proteção. Além do processo decisório envolver quatro critérios, a incerteza associada as preferências do decisor é considerada, de modo que apenas a ordem de preferência dos critérios é fornecida. Dessa forma, as principais implicações gerenciais do modelo estão associadas a ordem de preferência do decisor e ao desempenho das alternativas para cada critério.

Os resultados da aplicação numérica mostraram que o conflito ocorre entre o custo e os demais critérios (*SS*, *MA* e *RO*). As criticidades esperadas para *SS*, *MA* e *RO* tendem a ser menores a medida em que *K* e *T* diminuem, enquanto *CT* passa a aumentar substancialmente.

Com o uso do modelo proposto, a alternativa x_{10} (indicada como a melhor para *CT*) foi posicionada no *rank 21*, enquanto a alternativa x_1 (indicada como a melhor para *SS*, *MA* e *RO*) foi posicionada no *rank 50*. A alternativa com melhor desempenho, dentre as avaliadas, foi a alternativa x_{20} , que atende satisfatoriamente a ordem de preferência considerada. Esta alternativa, apesar de não gerar o valor ótimo para cada critério separadamente, satisfaz as prioridades do decisor, por fornecer valores condizentes com sua ordem de preferência entre os critérios. Isso faz com que haja um equilíbrio a respeito do impacto da decisão para as áreas afetadas por um eventual acidente.

Dessa forma, quando um acidente tiver potencial para gerar perdas em diferentes áreas, é recomendado que os gestores de manutenção evitem estabelecer as políticas de inspeção dos sistemas de proteção tomando como base apenas os impactos para uma única área, pois os benefícios obtidos podem se tornar insignificantes perto das perdas geradas para as demais áreas não consideradas.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de fornecer um maior apoio aos gestores de manutenção através de modelos de decisão voltados a definição adequada de políticas de inspeção e manutenção para sistemas sujeitos a falha oculta e degradação.

Sob o contexto das falhas ocultas, foi identificado que boa parte das propostas para definir as políticas de inspeção e manutenção de sistemas de proteção não levam em consideração alguns pontos relevantes e frequentemente discutidos na atualidade, deixando a desejar por não representarem adequadamente situações que podem ocorrer na vida real. O primeiro ponto diz respeito a omissão de mais critérios de decisão na avaliação dos possíveis impactos de uma falha oculta para outras áreas, além do custo. O segundo ponto refere-se a não consideração de práticas de melhoria contínua sob as ações de manutenção. Para cobrir estes *gaps*, dois modelos de decisão foram propostos.

No primeiro modelo, o grande diferencial foi o desenvolvimento de duas equações de melhoria contínua (Lei do Poder e Lei Exponencial) para representar o progresso das ações de manutenção ao longo do tempo, além da inclusão de uma restrição de indisponibilidade máxima aceitável ao modelo para avaliar casos especiais, onde as decisões precisam ser tomadas sob o efeito de segurança. No segundo modelo, a contribuição foi uma abordagem multicritério, envolvendo custos e criticidades de saúde e segurança, meio ambiente e recuperação operacional, para auxiliar decisões sobre a política de inspeção de sistemas de proteção em um contexto envolvendo incerteza.

Para o Modelo 1, os resultados da aplicação numérica mostraram que:

- A indisponibilidade dos componentes de segurança tende a crescer continuamente a medida em que se aumenta o número de inspeções diminui-se e o número de manutenções em um período de renovação;
- A não confiabilidade é o fator que mais afeta a indisponibilidade dos componentes de segurança;
- A eficácia da manutenção reduz a degradação dos componentes em maior proporção quando são adotadas práticas de MC sobre as ações de manutenção, o que pode gerar ganhos substanciais para a condição operacional do componente;
- A inclusão de uma restrição de indisponibilidade máxima aceitável para os componentes de segurança pode inviabilizar algumas políticas de manutenção,

sendo necessário mudar as estratégias sobre as ações de manutenção para evitar que essa restrição seja violada.

Para o Modelo 2, os resultados apontaram que:

- Existe um conflito evidente entre o custo e as criticidades de *SS*, *MA* e *RO*, onde a alternativa responsável por gerar o menor custo (alternativa x_{10}) produz criticidades relativamente altas para *SS*, *MA* e *RO*, enquanto a alternativa que gera as menores criticidades para *SS*, *MA* e *RO* (alternativa x_1) produz o maior custo, dentre as alternativas avaliadas; e
- Ao considerar os quatro critérios para tomada de decisão, a alternativa x_{20} foi indicada como a alternativa com melhor desempenho, dentre as avaliadas, por fornecer valores condizem com as considerações estabelecidas para aplicação numérica, mostrando, com isso, que é possível amenizar os conflitos existentes em problemas multicritério e tomar decisões equilibradas.

Por fim, com a análise de sensibilidade realizada, concluiu-se que ambos os modelos se comportaram como esperado quando submetidos a diferentes variações, apresentando robustez e coerência diante das considerações estabelecidas para cada um. Dessa forma, as propostas apresentadas neste trabalho se mostram validas para utilização em situações reais e podem, portanto, servir como ferramentas de auxílio para gestores de manutenção tomarem decisões mais seguras sobre as políticas de inspeção e manutenção de sistemas ou componentes sujeitos a falha oculta e degradação.

REFERÊNCIAS

- AHMADI, A. et al. Optimum failure management strategy for periodically inspected units with imperfect maintenance. *IFAC - Papers On Line*, v. 49, n. 12, p. 799–804, 2016.
- AHMADI, A.; BLOCK, J. M.; KUMAR, U. Risk based maintenance deferral for components subject to hidden failure. *Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2012.
- AHMADI, A.; KUMAR, U. Cost based risk analysis to identify inspection and restoration intervals of hidden failures subject to aging. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 60, n. 1, p. 197–209, 2011.
- AHMADI, A.; KUMAR, U.; GHODRATI, B. Risk based maintenance decision for periodically tested repairable components subject to hidden failure. *2010 2nd International Conference on Reliability, Safety and Hazard, ICRESH-2010: Risk-Based Technology and Physics-of-Failure Methods*, p. 197–204, 2010.
- ASCHER, H.; FEINGOLD, H. *Repairable systems reliability: modeling, inference, misconceptions and their causes*. New York: M. Dekker, 1984.
- BABISHIN, V.; TAGHIPOUR, S. Optimal maintenance policy for multicomponent systems with periodic and opportunistic inspections and preventive replacements. *Applied Mathematical Modelling*, v. 40, n. 23–24, p. 1339–1351, 2016a.
- BABISHIN, V.; TAGHIPOUR, S. Joint optimal maintenance and inspection for a k-out-of-n system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 87, n. 5–8, p. 1739–1749, 2016b.
- BADÍA, F. G.; BERRADE, M. D.; CAMPOS, C. A. Optimization of inspection intervals based on cost. *Journal of Applied Probability*, v. 38, n. 4, p. 872–881, 2001.
- BADÍA, F. G.; BERRADE, M. D.; CAMPOS, C. A. Optimal inspection and preventive maintenance of units with revealed and unrevealed failures. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 78, n. 2, p. 157–163, 2002.
- BAGHAEI, A. 3-Parameters SPW technique: A new method for evaluation of target safety integrity level. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 26, n. 6, p. 1257–1261, 2013.
- BAI, Y.; BAI, Q. *Subsea Pipelines and Risers*. 1. ed. Oxford, UK: Elsevier Ltd, 2005.
- BAI, Y.; BAI, Q. Consequences of Failure Modeling for Oil and Gas Spills. *Subsea Pipeline Integrity and Risk Management*, p. 345–362, 2014.
- BEN-DAYA, M.; RAHIM, M. A. Effect of maintenance on the economic design of \bar{x} -control chart. *European Journal of Operational Research*, v. 120, n. 1, p. 131–143, 2000.
- 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, n. 3, p. 716–725, 2012.
- 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.
- BJARNASON, E. T. S.; TAGHIPOUR, S.; BANJEVIC, D. Joint optimal inspection and inventory for a k-out-of-n system. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 131, p. 203–215, 2014.
- 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, 2014.
- CHAN, F. T. S. et al. Implementation of total productive maintenance: A case study. *International Journal of Production Economics*, v. 95, n. 1, p. 71–94, 2005.
- CHEN, Y. et al. Imperfect Maintenance Policy Considering Positive and Negative Effects for Deteriorating Systems with Variation of Operating Conditions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, v. 15, n. 2, p. 872–878, 2018.
- CHIAVENATO, I. *Administração nos novos tempos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- DA SILVA, J. G.; LOPES, R. S. An integrated framework for mode failure analysis, delay time model and multi-criteria decision-making for determination of inspection intervals in complex systems. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 51, n. April 2017, p. 17–28, 2018.
- DE ALMEIDA, A. T. *Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério*. São Paulo: Atlas, 2013.
- DE ALMEIDA, A. T. et al. *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*. 1. ed. [s.l.] Springer, 2015.
- DE FELICE, F.; PETRILLO, A.; MONFRE, S. Improving Operations Performance with World Class Manufacturing Technique: A Case in Automotive Industry. *Operations Management*, p. 1–30, 2015.
- DE OLIVEIRA, D. DE P. R. *Planejamento Estratégico*. 22. ed. São Paulo: Atlas, 2006.
- DO, P. et al. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 133, p. 22–32, 2015.
- EBELING, C. E. *An introduction to reliability and maintainability engineering*. 2. ed. Long Grove, Ill.: Waveland Press, 2010.
- EHRGOTT, M.; FIGUEIRA, J. R.; GRECO, S. *Trends in Multiple Criteria Decision Analysis*. New York: Springer, 2010.

- FELLER, W. On the logistic law of growth and its empirical verifications in biology. *Acta Biotheoretica*, v. 5, n. 2, p. 51–66, 1940.
- FRENCH, S.; GELDERMANN, J. The varied contexts of environmental decision problems and their implications for decision support. v. 8, p. 378–391, 2005.
- GELDERMANN, J. et al. Multi-criteria decision support and evaluation of strategies for nuclear remediation management. v. 37, p. 238–251, 2009.
- HALEEM, A.; QADRI, M. A.; KUMAR, S. Analysis of critical success factors of world-class manufacturing practices : an application of interpretative structural modelling and interpretative ranking process. *Production Planning & Control: The Management of Operations*, v. 23, n. 10–11, p. 37–41, 2012.
- HAUGEN, S.; EDWIN, N. J. Dynamic risk analysis for operational decision support. *EURO Journal on Decision Processes*, v. 5, n. 1, p. 41–63, 2017.
- HOKKANEN, J.; LAHDELMA, R.; SALMINEN, P. A multiple criteria decision model for analyzing and choosing among different development patterns for the Helsinki cargo harbor. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 33, n. 1, p. 1–23, 1999.
- HOKKANEN, J.; LAHDELMA, R.; SALMINEN, P. Multicriteria decision support in a technology competition for cleaning polluted soil in Helsinki. *Journal of Environmental Management*, v. 60, n. 4, p. 339–348, 2000.
- HU, C. et al. A new remaining useful life estimation method for equipment subjected to intervention of imperfect maintenance activities. *Chinese Journal of Aeronautics*, v. 31, n. 3, p. 514–528, 2018.
- JAYABALAN, V.; CHAUDHURI, D. Cost Optimization of Maintenance Scheduling for a System with Assured Reliability. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 41, n. 1, p. 21–25, 1992a.
- JAYABALAN, V.; CHAUDHURI, D. Optimal maintenance and replacement policy for a deteriorating system with increased mean downtime. *Naval Research Logistics*, v. 39, n. 1, p. 67–78, 1992b.
- JAYABALAN, V.; CHAUDHURI, D. Sequential imperfect preventive maintenance policies: a case study. *Microelectron Reliability*, v. 32, n. 9, p. 1223–1229, 1992c.
- KANČEV, D. et al. Time-dependent unavailability of equipment in an ageing NPP : Sensitivity study of a developed model. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 148, p. 11–20, 2016.
- KANČEV, D.; ČEPIN, M.; GJORGIEV, B. Development and application of a living probabilistic safety assessment tool: Multi-objective multi-dimensional optimization of surveillance requirements in NPPs considering their ageing. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 131, p. 135–147, 2014.
- KHATAB, A. Maintenance optimization in failure-prone systems under imperfect preventive maintenance. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 29, n. 3, p. 707–717, 2018.

- KHATAB, A.; AIT-KADI, D.; REZG, N. Availability optimisation for stochastic degrading systems under imperfect preventive maintenance. *International Journal of Production Research*, v. 52, n. 14, p. 4132–4141, 2014.
- KHATAB, A.; DIALLO, C.; SIDIBE, I. B. Optimizing upgrade and imperfect preventive maintenance in failure-prone second-hand systems. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 43, p. 58–78, 2017.
- KLEFSJÖ, B.; KUMAR, U. Goodness-of-Fit Tests for the Power-Law Process Based on the TTT-Plot. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 41, n. 4, p. 593–598, 1992.
- KONGSVIK, T. et al. Decisions and decision support for major accident prevention in the process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. v. 35, 2015.
- LAHDELMA, R.; MAKKONEN, S.; SALMINEN, P. Two ways to handle dependent uncertainties in multi-criteria decision problems. *Omega*, v. 37, n. 1, p. 79–92, 2009.
- LAHDELMA, R.; MIETTINEN, K.; SALMINEN, P. Ordinal criteria in stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA). *European Journal of Operational Research*, v. 147, n. 1, p. 117–127, 2003.
- LAHDELMA, R.; SALMINEN, P. Smaa-2: Stochastic Multicriteria Analysis for Group Decision Making. *Operational Research*, v. 49, n. 3, p. 444–454, 2001.
- LANDRY, M.; MALOUIN, J. L.; ORAL, M. Model validation in operations research. *European Journal of Operational Research*, v. 14, n. 3, p. 207–220, 1983.
- LI, Y.; CHEN, Z.; PAN, E. Joint Economic Design of CUSUM Control Chart and Age-Based Imperfect Preventive Maintenance Policy. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2018, 2018.
- LIAO, W.; PAN, E.; XI, L. Preventive maintenance scheduling for repairable system with deterioration. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 21, n. 6, p. 875–884, 2010.
- LIE, C. H.; CHUN, Y. H. An Algorithm for Preventive Maintenance Policy. *IEEE Transactions on Reliability*, n. 1, p. 71–75, 1986.
- LIN, D.; ZUO, M. J.; YAM, R. C. M. General Sequential Imperfect Preventive Maintenance Models. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, v. 7, n. 3, p. 253–266, 2000.
- LIU, B. et al. An imperfect maintenance policy for mission-oriented systems subject to degradation and external shocks. *Computers and Industrial Engineering*, v. 102, p. 21–32, 2016.
- LIU, B. et al. Maintenance Scheduling for Multicomponent Systems with Hidden Failures. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 66, n. 4, p. 1280–1292, 2017.
- LIU, C. et al. The security risk assessment methodology. *Procedia Engineering*, v. 43, n. 65, p. 600–609, 2012.
- MALIK, M. A. K. Reliable preventive maintenance scheduling. *AIIE Transactions*, v. 11, n.

- 3, p. 221–228, 1979.
- MARTÓN, I. et al. Optimization of test and maintenance of ageing components consisting of multiple items and addressing effectiveness. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 153, p. 151–158, 2016.
- MARTÓN, I.; SÁNCHEZ, A. I.; MARTORELL, S. Ageing PSA incorporating effectiveness of maintenance and testing. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 139, p. 131–140, 2015.
- MARTORELL, P. et al. Unavailability model for demand-caused failures of safety components addressing degradation by demand-induced stress, maintenance effectiveness and test efficiency. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 168, n. May, p. 18–27, 2017a.
- MARTORELL, P. et al. Time-dependent unavailability model integrating on demand-caused and standby-related failures addressing positive and negative effects of testing and maintenance. *Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World - ESREL 2018*, p. 595–599, 2018.
- MARTORELL, S. et al. Parameter Estimation of a Reliability Model of Demand-Caused and Standby-Related Failures of Safety Components Exposed to Degradation by Demand Stress and Ageing That Undergo Imperfect Maintenance. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2017, 2017b.
- MARTORELL, S.; MUNOZ, A.; SERRADELL, V. Age-dependent models for evaluating risks & costs of surveillance & maintenance of components. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 45, n. 3, p. 433–442, 1996.
- MARTORELL, S.; SANCHEZ, A.; SERRADELL, V. Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 64, n. 1, p. 19–31, 1999.
- MCKONE, K. E.; SCHROEDER, R. G.; CUA, K. O. The impact of total productive maintenance practices on manufacturing performance. *Journal of Operations Management*, v. 19, n. 1, p. 39–58, 2001.
- MENOU, A. et al. Decision support for centralizing cargo at a Moroccan airport hub using stochastic multicriteria acceptability analysis. *European Journal of Operational Research*, v. 204, n. 3, p. 621–629, 2010.
- MINTZBERG, F. Strategic decision making 7. v. 13, p. 17–37, 1992.
- MITROFF, I. I. et al. On Managing Science in the Systems Age: Two Schemas for the Study of Science as a Whole Systems Phenomenon. *Interfaces*, v. 4, n. 3, p. 46–58, 1974.
- MITROFF, I. I. Towards a Theory of Systemic Problem Solving: Prospects and Paradoxes. *International Journal of General Systems*, v. 4, n. 1, p. 47–59, 1977.
- MODARRES, M. *Risk Analysis in Engineering Techniques, Tools and Trends*. New York: Taylor & Francis, U.S.A., 2006.

- MONTIBELLER, G.; FRANCO, L. A. Raising the bar : strategic multi-criteria decision analysis. v. 62, n. 5, p. 855–867, 2011.
- MOUBRAY, J. *Reliability-centered Maintenance*. 2. ed. Oxford, UK: Industrial Press, 1997.
- NAKAGAWA, T. Sequential Imperfect Preventive Maintenance Policies. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 37, n. 3, p. 295–298, 1988.
- NFPA. *National Fire Protection Association*. Disponível em: <<https://www.nfpa.org/Codes-and-Standards/All-Codes-and-Standards/Codes-and-Standards>>. Acesso em: 26 dez. 2018.
- NOWLAN, F. S.; HEAP, H. F. *Reliability-centered maintenance*. [s.l.] DTIC Document, 1978.
- OKOH, P.; HAUGEN, S. A study of maintenance-related major accident cases in the 21st century. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 92, n. 4, p. 346–356, 2014.
- PHAM, H.; WANG, H. Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research*, v. 94, p. 425–438, 1996.
- PHAN, D. T.; ZHU, Y. Multi-stage optimization for periodic inspection planning of geo-distributed infrastructure systems. *European Journal of Operational Research*, v. 245, n. 3, p. 797–804, 2015.
- PONCHET, A.; FOULADIRAD, M.; GRALL, A. Maintenance policy on a finite time span for a gradually deteriorating system with imperfect improvements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, v. 225, n. 2, p. 105–116, 2010.
- RAUSAND, M.; HØYLAND, A. *System reliability theory: models, statistical methods, and applications*. [s.l.] John Wiley & Sons, 2004.
- RAUSAND, M.; VATN, J. Reliability modeling of surface controlled subsurface safety valves. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 61, n. 1–2, p. 159–166, 1998.
- REZAEI, E. A new model for the optimization of periodic inspection intervals with failure interaction: A case study for a turbine rotor. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, v. 9, p. 148–156, 2017.
- RIGDON, S. E.; BASU, A. P. *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. New York: John Wiley and Sons, 2000.
- SAGASTI, F. R.; MITROFF, I. I. Operations research from the viewpoint of general systems theory. *Omega*, v. 1, n. 6, p. 695–709, 1973.
- SALAHELDIN, S. I.; EID, R. The implementation of world class manufacturing techniques in Egyptian manufacturing firms: An empirical study. *Industrial Management and Data Systems*, v. 107, n. 4, p. 551–566, 2007.
- SANCHEZ, A. et al. Addressing imperfect maintenance modelling uncertainty in unavailability and cost based optimization. *Reliability Engineering and System Safety*,

- v. 94, n. 1, p. 22–32, 2009.
- SCHONBERGER, R. J. (ED.). *World class manufacturing: the lessons of simplicity applied*. New York, NY.: The Free Press, 1986.
- 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, n. July 2017, p. 141–156, 2018.
- SUMMERS, A.; VOGTMANN, W.; SMOLEN, S. Improving PHA/LOPA by consistent consequence severity estimation. *Journal of Loss Prevention in the Process Safety Progress*, v. 24, n. 1, p. 879–885, 2011.
- TAGHIPOUR, S.; BANJEVIC, D. Periodic inspection optimization models for a repairable system subject to hidden failures. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 60, n. 1, p. 275–285, 2011.
- 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, n. 3, p. 649–660, 2012.
- TAGHIPOUR, S.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A. K. S. Risk-based inspection and maintenance for medical equipment. *IIE Annual Conference and Expo 2008*, p. 104–109, 2008.
- TAGHIPOUR, S.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A. K. S. Reliability analysis of maintenance data for complex medical devices. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 27, n. 1, p. 71–84, 2010.
- TANG, T. et al. Availability of a system subject to hidden failure inspected at constant intervals with non-negligible downtime due to inspection and downtime due to repair/replacement. *Journal of Statistical Planning and Inference*, v. 143, n. 1, p. 176–185, 2013.
- TERVONEN, T.; HAKONEN, H.; LAHDELMA, R. Elevator planning with stochastic multicriteria acceptability analysis. *Omega*, v. 36, n. 3, p. 352–362, 2008.
- TODOROVIĆ, P. M. et al. An implementation of infrared thermography in maintenance plans within a world class manufacturing strategy. *Thermal Science*, v. 17, n. 4, p. 977–987, 2013.
- VAN DER WEIDE, J. A. M.; PANDEY, M. D. A stochastic alternating renewal process model for unavailability analysis of standby safety equipment. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 139, p. 97–104, 2015.
- VAURIO, J. K. On time-dependent availability and maintenance optimization of standby units under various maintenance policies. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 56, n. 1, p. 79–89, 1997.
- VAURIO, J. K. Availability and cost functions for periodically inspected preventively maintained units. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 63, n. 2, p. 133–140,

- 1999.
- WANG, H. K. et al. Condition-Based Maintenance with Scheduling Threshold and Maintenance Threshold. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 65, n. 2, p. 513–524, 2015.
- WANG, H.; PHAM, H. *Reliability and Optimal Maintenance*. London: Springer London Ltd, 2006.
- WANG, Y.; PHAM, H. A multi-objective optimization of imperfect preventive maintenance policy for dependent competing risk systems with hidden failure. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 60, n. 4, p. 770–781, 2011.
- YANG, F. et al. Effects of protection system hidden failures on bulk power system reliability. *2006 38th Annual North American Power Symposium, NAPS-2006 Proceedings*, p. 517–523, 2006.
- YE, Z.; REVIE, M.; WALLS, L. A load sharing system reliability model with managed component degradation. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 63, n. 3, p. 721–730, 2014.
- YEA, Z. S.; XIE, M. Stochastic modelling and analysis of degradation for highly reliable products. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, v. 31, n. 1, p. 16–32, 2015.
- ZANGWILL, W. I. *Lightning strategies for innovation : how the world's best firms create new products*. New York: Lexington Books, 1993.
- ZANGWILL, W. I.; KANTOR, P. B. Toward a Theory of Continuous Improvement and the Learning Curve. *Management Science*, v. 44, n. 7, p. 910–920, 1998.
- 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, X.; HE, S.; XIE, M. Utilizing experimental degradation data for warranty cost optimization under imperfect repair. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 177, n. May, p. 108–119, 2018.
- ZHOU, X. et al. A preventive maintenance model for leased equipment subject to internal degradation and external shock damage. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 154, p. 1–7, 2016.