



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

ALEXANDRE RAMALHO ALBERTI

**CONTRIBUIÇÕES PARA A DEFINIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO  
PARA SISTEMAS DE PRONTIDÃO**

Recife  
2018

ALEXANDRE RAMALHO ALBERTI

**CONTRIBUIÇÕES PARA A DEFINIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO  
PARA SISTEMAS DE PRONTIDÃO**

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

Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.

Recife  
2018





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

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

**ALEXANDRE RAMALHO ALBERTI**

***“CONTRIBUIÇÕES PARA A DEFINIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO PARA***  
***SISTEMAS DE PRONTIDÃO”***

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL**

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera o(a) candidato(a) **ALEXANDRE RAMALHO ALBERTI, APROVADO(A)**.

Recife, 22 de fevereiro de 2018.

---

Prof. CRISTIANO ALEXANDRE VIRGÍNIO CAVALCANTE, Doutor (UFPE)

---

Prof<sup>a</sup>. DANIELLE COSTA MORAIS, Doutora (UFPE)

---

Prof. JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, Doutor (UFPE)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Leonice e Luiz Henrique, e a minha irmã, Izabela, pelos ensinamentos e apoio ao longo da minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Professor Cristiano, por toda a orientação concedida e aprendizado adquirido ao longo do mestrado. Agradeço também a equipe do RANDOM, pela amizade e pelo compartilhamento de experiências e conhecimento, o que foi muito importante para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos amigos do PPGEF, especialmente Lucas, Luna e Naiara, pelo grande apoio que me deram nessa caminhada.

Agradeço aos amigos com quem tive a oportunidade de dividir apartamento durante o mestrado, Cícero, Danielly, Ziel, Luana e Rafaella, e aos vizinhos Yury, Vinícius e Rodolfo, por me acolherem no Recife e tornarem essa experiência tão engrandecedora. Agradeço também aos amigos Guilherme, Leomar e Lucas, que mesmo a distância continuaram sendo grandes amigos.

Agradeço ao PPGEF UFPE, pelo aprendizado e pela oportunidade de vislumbrar o que desejo para o meu futuro profissional.

Agradeço a FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco) pelo apoio financeiro proporcionado.

## RESUMO

Sistemas de prontidão usualmente permanecem inativos durante os períodos de operação normal do sistema produtivo principal, e seu funcionamento é requerido diante da ocorrência de demandas específicas, como eventos de emergência. Conseqüentemente, tais sistemas apresentam falhas ocultas, que só podem ser detectadas numa emergência ou através de inspeções. O objetivo deste trabalho é apresentar contribuições para a definição de políticas de manutenção para sistemas de prontidão, e o seu desenvolvimento foi motivado por um estudo de caso sobre manutenção de válvulas de isolamento utilizadas em redes de distribuição de água. Para tal, uma política mista de inspeção e substituição preventiva para um sistema de prontidão é descrita por um modelo matemático inovador, que incorpora um conjunto de aspectos de qualidade da manutenção, que podem afetar o seu desempenho. Para o modelo, é assumido um sistema composto por um suporte e um componente, que juntos desempenham uma função operacional; o componente apresenta um modelo de falha em três estágios, com um estado de defeito precedendo o estado de falha, e o *status* operacional do sistema depende de seu estado. Com a aplicação do modelo é possível estimar o custo esperado e o risco de ocorrência de demanda não atendida em função das variáveis de decisão da política de manutenção. Primeiramente, são apresentados os resultados da otimização da política de manutenção considerando cada um destes critérios separadamente. Depois, é apresentada uma abordagem multicritério, baseada na aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), para determinar a melhor relação de compromisso entre estes critérios. A aplicação do modelo proposto permite obter algumas orientações importantes, e nem sempre triviais, sobre a frequência adequada para as ações de manutenção, e sobre os recursos utilizados, permitindo verificar condições que justificam o investimento em manutenção de maior qualidade, assim como que aspectos devem ser priorizados.

Palavras-chave: Manutenção. Sistema de prontidão. Qualidade. Decisão multicritério. Rede de distribuição de água.

## ABSTRACT

Preparedness systems usually remain inactive during periods of normal operation of the main productive system, and their functioning is required in the face of the occurrence of specific demands, such as emergency events. Consequently, such systems present hidden faults, which can only be detected in an emergency or through inspections. The objective of this work is to present contributions to the definition of maintenance policies for preparedness systems, and its development was motivated by a case study on the maintenance of isolation valves used in water distribution networks. To this end, a mixed inspection and preventive replacement policy for a preparedness system is described by an innovative mathematical model that incorporates a set of quality aspects of maintenance that can affect its performance. For the model, it is assumed a system composed of a support and a component, which together play an operational function; the component has a three-stage failure model, with a defective state preceding failure, and the operational status of the system depends on its state. With the application of the model it is possible to estimate the expected cost and the risk of occurrence of unmet demand as a function of the decision variables of the maintenance policy. Firstly, the results of the optimization of the maintenance policy are presented considering each one of these criteria separately. Then, a multicriteria approach is presented, based on the application of Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), to determine the best compromise solution for these criteria. The application of the proposed model allows the decision-maker to obtain some important, and not always trivial, guidelines on the appropriate frequency for the maintenance actions, and on the resources used, allowing to verify conditions that justify the investment in maintenance of higher quality, as well as what aspects should be prioritized.

Keywords: Maintenance. Preparedness system. Quality. Multicriteria decision aid. Water distribution network.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo de modelagem.....	20
Figura 2 – Representação do <i>delay-time</i> .....	23
Figura 3 – Princípio ALARP: limites de tolerância.....	31
Figura 4 – Unidades componentes de um sistema de abastecimento de água.....	32
Figura 5 – Procedimento para construção de um modelo de decisão multicritério.....	36
Figura 6 – Representação de loteria e equivalente certo.....	39
Figura 7 – Independência entre loterias característica da condição de independência aditiva.....	41
Figura 8 – Erosão decorrente de um vazamento de água.....	45
Figura 9 – Detalhamento do redutor de engrenagens de uma válvula borboleta.....	49
Figura 10 – Parafuso rosca sem fim danificado devido ao excesso de força empregado para fechamento da válvula.....	49
Figura 11 – Estrutura proposta para o planejamento da manutenção.....	50
Figura 12 – Cenário 1.....	56
Figura 13 – Cenário 2.....	57
Figura 14 – Cenário 3.....	58
Figura 15 – Cenário 4.....	59
Figura 16 – Cenário 5.....	60
Figura 17 – Cenário 6.....	61
Figura 18 – Cenário 7.....	62
Figura 19 – Cenário 8.....	63
Figura 20 – Cenário 9.....	64
Figura 21 – Cenário 10.....	64
Figura 22 – $C_{\infty}$ (un.) em função de $T$ , para diferentes valores de $M$ .....	70
Figura 23 – $T^*$ em função de $M$ e $r$ (variando sobre o caso base), para diferentes valores de $r$ .....	75
Figura 24 – $C_{\infty}^*$ em função de $M$ e $r$ (variando sobre o caso base), para diferentes valores de $r$ .....	77
Figura 25 – $Pr$ (para 5 anos) em função de $T$ , para diferentes valores de $M$ .....	79
Figura 26 – Hierarquia de objetivos do problema.....	85

Figura 27 – $U_c$ em função de $C_\infty$ : função ajustada (–) e pontos intermediários obtidos na elicitação (•).....	89
Figura 28 – $U_r$ em função de $Pr$ : função ajustada (–) e pontos intermediários obtidos na elicitação (•).....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos modelos apresentados nos artigos citados.....	26
Tabela 1 – Resumo dos modelos apresentados nos artigos citados.....	30
Tabela 2 – Caracterização do comportamento do decisor com relação ao risco.....	40
Tabela 4 – Notação utilizada no desenvolvimento do trabalho.....	52
Tabela 5 – Aplicação do modelo em contextos mais simples.....	67
Tabela 6 – Parâmetros das distribuições de probabilidade de X e H (Weibull).....	68
Tabela 7 – Análise da sensibilidade do modelo aos parâmetros que caracterizam a qualidade da manutenção (critério de referência: custo).....	72
Tabela 8 – Exploração da relação entre custo e qualidade da manutenção.....	76
Tabela 9 – Relação entre $\mu$ , CUD e a política de manutenção ótima.....	77
Tabela 10 – Análise da sensibilidade do modelo aos parâmetros que caracterizam a qualidade da manutenção (critério de referência: risco).....	80
Tabela 11 – Notação utilizada no desenvolvimento do capítulo 4.....	84
Tabela 12 – Ilustração do processo de delimitação do espaço de consequências.....	87
Tabela 13 – Delimitação do espaço de consequências para a aplicação do modelo multicritério.....	87
Tabela 14 – Pontos intermediários da função utilidade unidimensional para custo.....	88
Tabela 15 – Pontos intermediários da função utilidade unidimensional para risco.....	90
Tabela 16 – Resultado e análise de sensibilidade.....	92
Tabela 17 – Delimitação do espaço de consequências para análise multicritério de cenários de investimento em manutenção de maior qualidade.....	95
Tabela 18 – Avaliação multicritério dos cenários de investimento em manutenção de maior qualidade.....	96

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	12
1.1	<b>Objetivos</b>	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.1	Objetivos específicos	14
1.2	<b>Metodologia</b>	14
1.3	<b>Estrutura do trabalho</b>	15
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA</b>	16
2.1	<b>Manutenção</b>	16
2.1.1	Estratégias de manutenção	17
2.1.2	Modelagem matemática e otimização da manutenção	19
2.1.3	Medidas de confiabilidade	21
2.1.4	O conceito delay-time	22
2.1.5	Sistemas de prontidão	24
2.1.6	Qualidade da manutenção	26
2.2	<b>Risco</b>	30
2.3	<b>Redes de distribuição de água</b>	32
2.3.1	Válvulas de isolamento	33
2.4	<b>Decisão multicritério</b>	34
2.4.1	Teoria da utilidade multiatributo (MAUT)	38
2.5	<b>Síntese conclusiva</b>	42
3	<b>MODELO MATEMÁTICO – MOTIVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO</b>	44
3.1	<b>Contexto e sistema estudado</b>	44
3.1.1	Aspectos operacionais	45
3.1.2	Aspectos de falha	46
3.1.3	Manutenção	47
3.1.4	Inspeção	48
3.2	<b>O modelo proposto</b>	50
3.2.1	Política de manutenção	51
3.2.2	Notação comum	51
3.2.3	Pressupostos do modelo	53

3.2.4 Desenvolvimento do modelo .....	55
3.2.5 Adaptando o modelo para outros contextos .....	67
<b>3.3 Aplicação numérica .....</b>	<b>67</b>
3.3.1 Especificação dos valores dos parâmetros do modelo (caso base).....	68
3.3.2 Parte 1 – Otimização do custo .....	69
3.3.3 Parte 2 – Otimização do risco.....	78
3.3.4 Síntese conclusiva .....	81
<b>4 ABORDAGEM MULTICRITÉRIO .....</b>	<b>82</b>
4.1 <b>Cenário da aplicação .....</b>	<b>82</b>
4.2 <b>Construindo o modelo multicritério .....</b>	<b>83</b>
4.2.1 Notação comum.....	84
4.2.2 Fase preliminar .....	84
4.2.3 Modelagem de preferências.....	86
4.2.4 Finalização – avaliação das alternativas e análise de sensibilidade .....	92
4.3 <b>Investindo em manutenção de maior qualidade .....</b>	<b>93</b>
4.4 <b>Síntese conclusiva .....</b>	<b>97</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>98</b>
5.1 <b>Dificuldades e limitações .....</b>	<b>98</b>
5.2 <b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>99</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>100</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas de prontidão, tais como alarmes, sistemas de proteção contra incêndios, desfibriladores e sistemas de defesa militar, usualmente permanecem inativos durante os períodos de operação normal do sistema produtivo principal, e seu funcionamento é requerido diante da ocorrência de demandas específicas, como eventos de emergência. Conseqüentemente, tais sistemas apresentam falhas ocultas, que só podem ser detectadas numa emergência ou através de inspeções periódicas (VAURIO, 1999; JIA & CHRISTER, 2002; CAVALCANTE, SCARF & DE ALMEIDA, 2011).

Em geral, a ocorrência de demandas não atendidas por conta de um sistema de prontidão indisponível pode ter efeitos bastante negativos, o que justifica a preocupação com o planejamento adequado da manutenção desses sistemas.

Usualmente, o processo de planejamento da manutenção é realizado em três etapas principais: inicialmente, é estabelecido o escopo da política de manutenção, considerando os tipos de ações que são pertinentes a cada caso, para então se determinar a frequência com que tais ações devem ser realizadas. Esta etapa pode ser realizada através de avaliações subjetivas, como é o caso da abordagem RCM (*reliability centred maintenance*), ou com a aplicação de modelos matemáticos, com vista a otimizar o critério de avaliação considerado. Por fim, buscase uma adequação entre a política de manutenção e os recursos disponíveis para executá-la. O que por vezes é ignorado nesse processo é o impacto da qualidade dos recursos envolvidos no desempenho da política de manutenção (JIA & CHRISTER, 2002; DE ALMEIDA *et al.*, 2015b).

De modo a trazer esse elemento para o processo decisório, alguns trabalhos têm apresentado modelos matemáticos que permitem considerar determinados aspectos de qualidade da manutenção (SCARF *et al.*, 2009; CAVALCANTE, SCARF & DE ALMEIDA, 2011; BERRADE, CAVALCANTE & SCARF, 2012; SCARF & CAVALCANTE, 2012; BERRADE, SCARF & CAVALCANTE, 2015; ALBERTI *et al.*, 2017).

O modelo matemático busca representar a realidade de forma aproximada, não sendo capaz de cobrir todos os seus aspectos, de todo modo, pode ser uma ferramenta muito útil para guiar a tomada de decisões em manutenção (AVEN & JENSEN 1996).

Neste trabalho é apresentado um modelo matemático para uma política mista de inspeção e substituição preventiva aplicada a um sistema de prontidão, que agrega diferentes aspectos de

qualidade abordados anteriormente em outros trabalhos. Trata-se de um modelo inovador, que apresenta algumas contribuições ao modelo proposto por Alberti *et al.* (2017), de forma que é possível não apenas estimar o custo esperado resultante da adoção de uma determinada política de manutenção, como também estimar o risco de ocorrência de eventos de demanda não atendida. Após a apresentação do modelo, é proposta uma abordagem multicritério, baseada na aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), considerando os critérios custo e risco, que permite uma forma diferente de tratar o problema.

O desenvolvimento deste trabalho foi motivado por um estudo de caso sobre manutenção de válvulas de isolamento utilizadas em redes de distribuição de água, conforme detalhamento apresentado ao longo do texto, porém a sua contribuição não é restrita apenas a esse contexto. Com as devidas ponderações, o modelo e abordagem multicritério propostos podem ser aplicados em outros contextos de sistemas de prontidão.

Uma aplicação numérica, no contexto de válvulas de isolamento, é apresentada de forma a ilustrar as possibilidades de uso do modelo proposto. A partir dos resultados obtidos, busca-se avaliar o impacto de diferentes aspectos da qualidade da manutenção no desempenho do sistema de prontidão, e verificar as condições que justificam o investimento em manutenção de maior qualidade. Para o cenário da aplicação, busca-se responder perguntas como:

- Quais aspectos de qualidade da manutenção têm maior impacto no desempenho da política de manutenção?
- Vale a pena investir em manutenção de maior qualidade?
- Quais aspectos devem ser priorizados nesse investimento?

Dessa forma, este trabalho traz contribuições significativas para o processo de planejamento da manutenção para sistemas de prontidão. Em especial, observa-se a influência da qualidade dos recursos envolvidos com a atividade de manutenção. A apropriação destes recursos com as atividades que executam em geral é pouco estudada, ou mesmo omitida no processo de estabelecimento de planos de manutenção, o que pode resultar em grandes equívocos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é apresentar contribuições para o processo de definição de políticas de manutenção para sistemas de prontidão, a partir das oportunidades observadas em

um estudo de caso sobre manutenção de válvulas de isolamento utilizadas em redes de distribuição de água.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo principal, foi necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Investigar os aspectos relevantes sobre manutenção e inspeção de válvulas de isolamento utilizadas em redes de distribuição de água;
- Definir um escopo de política de manutenção adequado para sistemas desta natureza (sistemas de prontidão);
- Desenvolver um modelo matemático que incorpore os aspectos relevantes que podem afetar o desempenho da política de manutenção;
- Realizar uma aplicação numérica e investigar as principais tendências verificadas, fazendo as devidas comparações com outros resultados disponíveis na literatura;
- Construir um modelo multicritério para apoiar na definição da política de manutenção, viabilizando o devido tratamento da multidimensionalidade das consequências associadas a eventos de falha;
- Realizar uma aplicação numérica do modelo multicritério, e uma análise crítica dos resultados obtidos.

## 1.2 Metodologia

Com base em critérios de classificação apresentados por Marconi & Lakatos (1985) e Martins (2012), esta pesquisa pode ser classificada como:

- Quantitativa: visto que busca explorar as relações entre causa e efeito através da aplicação de modelos matemáticos;
- Aplicada: dado o seu interesse prático;
- Explicativa: visto que busca realizar um levantamento explicativo e avaliativo sobre o fenômeno em questão.

A pesquisa foi desenvolvida a partir das observações realizadas em um estudo de caso sobre válvulas de isolamento, e da identificação de oportunidades de contribuição para a literatura. Ao longo da pesquisa, buscou-se o encadeamento dos objetivos específicos, conforme a sequência lógica que fundamentou a estruturação deste trabalho.

O desenvolvimento dos modelos matemáticos aplicados a manutenção e a análise dos resultados foram realizados de forma a observar os seguintes aspectos, destacados por Turban (1967):

- **Atratividade:** os modelos devem ser capazes de representar bem a realidade (tanto quanto possível), de apresentar soluções robustas e não exigir um esforço computacional impraticável;
- **Competitividade:** os modelos devem ser capazes de apresentar resultados mais atrativos que os de outras alternativas de análise conhecidas;
- **Comunicação:** para a efetividade da aplicação do modelo, é importante a proposição de políticas que sejam fáceis de ser compreendidas e executadas na prática.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Esta dissertação está estruturada em cinco partes: Introdução; Referencial Teórico e Revisão da Literatura; Modelo Matemático – Motivação e Desenvolvimento; Abordagem Multicritério; e Conclusões.

No próximo capítulo, Referencial Teórico e Revisão da Literatura, são apresentados os conceitos presentes no desenvolvimento deste trabalho, e uma revisão da literatura sobre temas correlatos é realizada, de modo a evidenciar as contribuições aqui apresentadas.

No terceiro capítulo, Modelo Matemático – Motivação e Desenvolvimento, o contexto que motivou o desenvolvimento deste trabalho é detalhado, e um modelo matemático inovador é apresentado, incorporando aspectos relevantes observados no estudo de caso. Ao fim do capítulo, é feita uma aplicação numérica do modelo, e uma extensa discussão sobre as tendências observadas é realizada. No quarto capítulo, Abordagem Multicritério, um modelo multicritério é desenvolvido, fazendo uso do modelo matemático apresentado no capítulo anterior.

Por fim, no quinto capítulo, Conclusões, são apresentadas as conclusões da pesquisa, com indicação de alguns pontos de dificuldade e limitações, e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA

O objetivo deste capítulo é apresentar as bases teóricas que fundamentam este trabalho e uma revisão da literatura sobre temas correlatos. Primeiramente, são apresentados os conceitos relacionados a manutenção e risco. Depois, é feita uma abordagem do contexto que motivou o desenvolvimento deste trabalho; e por fim, uma revisão sobre decisão multicritério.

### 2.1 Manutenção

A manutenção pode ser definida como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um sistema em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (DING & KAMARUDDIN, 2015).

A gestão da manutenção lida com processos de natureza estocástica que podem comprometer o estado de um sistema, levando-o a um estado de falha, no qual não é possível dar continuidade à sua operação em conformidade com os requisitos estabelecidos. Uma vez em estado de falha, é necessária uma ação de manutenção para que o mesmo retorne ao estado operacional. Sistemas podem ser classificados como reparáveis, quando uma ação de reparo é capaz de retornar o sistema ao estado operacional, ou não reparáveis, quando para tal é necessário proceder com a sua substituição (NAKAGAWA, 2005).

Segundo De Almeida *et al.* (2015b), as falhas podem ser classificadas segundo três tipos básicos, de acordo com os mecanismos predominantes que resultam em sua ocorrência:

- Falhas precoces: decorrentes principalmente de defeitos de fabricação ou erros de projeto, tendem a ocorrer com maior frequência na fase inicial de operação do sistema;
- Falhas casuais: ocorrem de forma aleatória, em intervalos de tempo irregulares, normalmente devido a fatores não controlados e externos ao sistema;
- Falhas por desgaste: decorrentes do desgaste ou envelhecimento, tendem a apresentar maior incidência quanto maior a idade do sistema. Ações de manutenção preventiva podem ser efetivas para reduzir a incidência deste tipo de falha.

A crescente importância da manutenção para as organizações tem gerado cada vez mais interesse no desenvolvimento e implementação de estratégias ótimas de manutenção, a fim de melhorar a confiabilidade dos sistemas, prevenindo a ocorrência de falhas e reduzindo os custos de manutenção de sistemas deterioráveis (WANG, 2002).

Segundo Marquez *et al.* (2009), o processo de gerenciamento da manutenção pode ser dividido em duas etapas principais: a definição da estratégia da manutenção e posteriormente a sua implementação. A primeira etapa é desenvolvida a partir da definição dos objetivos da manutenção, que devem ser derivados do plano de negócios da organização. A estratégia pode ser traduzida na forma de uma política de manutenção, que estabelece orientações para a tomada de decisão com base em fatores observáveis como, por exemplo, a idade, o estado de deterioração do sistema, ou ambos. O planejamento da manutenção lida, então, com um problema de decisão sobre a definição da política mais adequada de acordo com o(s) critério(s) de avaliação considerado(s) (DEKKER & SCARF, 1998; TIJMS, 2003).

De acordo com Marquez (2007) e De Almeida *et al.* (2015b), as seguintes perguntas resumem bem o escopo do planejamento da manutenção:

- Qual sistema/componente será avaliado, suas características operacionais e comportamento de falha?
- O que pode ser feito?
- Quando deve ser feito?
- Que recursos devem ser empregados?

Essas perguntas normalmente são respondidas nessa ordem e de forma hierárquica. Quanto melhores as respostas, mais eficiente a política de manutenção resultante (DE ALMEIDA *et al.*, 2015b).

Partindo desse formato, os tópicos desta seção foram organizados de forma a apresentar, de maneira fluida e interligada, os conceitos presentes no desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, é apresentada uma revisão sobre estratégias de manutenção e modelagem matemática e otimização aplicadas à manutenção. Em seguida, são abordados conceitos importantes para a caracterização do sistema em estudo, com observações sobre os tipos de ações de manutenção adequados para o caso. Por fim, é feita uma revisão sobre a problemática da qualidade da manutenção, que tem estreita relação com a questão do planejamento de recursos (como foi discutido, por exemplo, por SCARF & CAVALCANTE, 2012).

### 2.1.1 Estratégias de manutenção

Diversos termos são encontrados na literatura para tratar dos tipos de manutenção. Para este trabalho são destacados os três tipos básicos seguintes, definidos pela norma NBR 5462/1994:

- Manutenção corretiva: procedimento realizado após a ocorrência da falha, com o objetivo de colocar o sistema em operação novamente. Ocasionalmente ocasiona a paralisação não planejada do processo produtivo.
- Manutenção preventiva: conjunto de ações planejadas, com o objetivo de prevenir a ocorrência de falhas e reverter o processo de deterioração do sistema.
- Manutenção preditiva: conjunto de ações planejadas, definidas com base no monitoramento do estado do sistema, com o objetivo de reduzir a frequência de ações preventivas e evitar a ocorrência de falhas.

É razoável considerar que a manutenção preditiva é um tipo de manutenção preventiva, que se vale de técnicas de análise e monitoramento do estado do sistema, a fim de identificar a real necessidade de intervenções de manutenção, contribuindo para não desperdiçar a vida útil dos sistemas. O termo manutenção preventiva, de forma mais ampla, também compreende ações planejadas para intervalos de tempo predeterminados, ou com base apenas na idade do sistema.

O desenvolvimento tecnológico tem contribuído para a prática da manutenção preditiva, viabilizando e fortalecendo a prática de inspeções. Ações de inspeção tem como objetivo apenas identificar o estado do sistema, sem interferir em seu processo de deterioração. De acordo com a tecnologia disponível e a estratégia adotada, as inspeções podem ser programadas para monitoramento contínuo, verificações periódicas ou verificações não periódicas do sistema (CHRISTER & WALLER, 1984; ALASWAD & XIANG, 2016).

As diretrizes sobre quais tipos de ações devem ser realizadas, e quando devem ser realizadas são estabelecidas pela política de manutenção. Políticas de manutenção podem ser agrupadas em diferentes categorias de acordo com a forma como lidam com as falhas. Ding & Kamaruddin (2015) identificam três categorias principais: políticas de manutenção corretiva, políticas de manutenção preventiva (incluindo as políticas de manutenção baseada na condição do sistema), e políticas que consideram a manutenção a um nível estratégico na organização.

As ações de manutenção também podem ser classificadas de acordo com o seu resultado, ou seja, o grau de restauração das condições operacionais do sistema. Pham & Wang (1996) apresentam a seguinte classificação:

- Manutenção perfeita: uma ação de manutenção que restaura a condição do sistema a um estado tão bom quanto novo. Em geral, a substituição de um sistema falho por um novo é uma manutenção perfeita.

- Mínimo reparo: uma ação de manutenção que retorna o sistema ao estado operacional, porém com a mesma idade (mesma taxa de falha) que apresentava no momento da ocorrência da falha. Ou seja, o sistema retorna a um estado tão ruim quanto no momento imediatamente anterior a ocorrência da falha.
- Manutenção imperfeita: uma ação de manutenção que não restaura o sistema a um estado tão bom quanto novo, porém a um estado melhor. Este caso inclui dois extremos: manutenção perfeita e mínimo reparo.
- Manutenção ruim: uma ação de manutenção que, de forma não deliberada, resulta no aumento da taxa de falha do sistema, sem que este venha a falhar.
- Manutenção danosa: uma ação de manutenção que, de forma não deliberada, resulta na falha do sistema.

Ações de manutenção imperfeita e mínimo reparo frequentemente são consideradas por políticas de manutenção, uma vez que, em geral, são menos dispendiosas que ações de manutenção perfeita, então podem contribuir para o alcance dos objetivos desejados (AVEN & JENSEN, 2000; FITOUHI, NOURELFATH & GERSHWIN, 2017). Por outro lado, ações de manutenção imperfeita, ruim ou danosa podem ser decorrentes da má qualidade do serviço realizado e dos recursos utilizados (PHAM & WANG, 1996).

Pham & Wang (1996) apontam algumas causas recorrentes de manutenção imperfeita, ruim ou danosa: reparo do componente errado, correção parcial da falha ou defeito, danos em componentes adjacentes decorrentes do reparo, avaliação incorreta da condição do sistema, erros humanos tais como ajustes errados e danos causados durante a manutenção, entre outros.

Ao se considerar a questão da qualidade da manutenção no processo decisório, este fator pode influenciar de forma significativa na definição da política de manutenção e no planejamento dos recursos envolvidos, conforme discussão apresentada no tópico 2.1.6.

### 2.1.2 Modelagem matemática e otimização da manutenção

Modelo, segundo Arenales *et al.* (2007), pode ser interpretado como um objeto abstrato, que busca reproduzir as principais características de um objeto real, a fim de representá-lo. A partir de uma aplicação e análise dos resultados obtidos com o modelo, é possível chegar a algumas conclusões e eventualmente tomar decisões acerca do problema real. O diagrama apresentado na Figura 1 representa o processo de modelagem matemática e sua influência nas decisões.

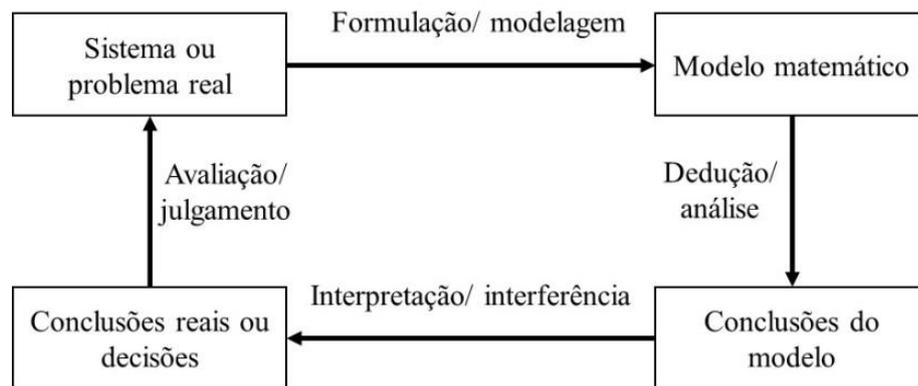


Figura 1 – Processo de modelagem.  
Fonte: Arenales et al. (2007).

O processo de modelagem matemática e otimização pode ter uma influência importante na definição da frequência com que as ações de manutenção devem ser realizadas. Ding & Kamaruddin (2015) observam que os modelos usados para derivar a política de manutenção ótima geralmente cobrem quatro aspectos principais:

- Uma descrição do sistema a ser mantido;
- Um modelo de como o sistema se deteriora ao longo do tempo e as consequências disso;
- Uma indicação das opções disponíveis de ação;
- Uma função objetivo ou uma ferramenta de análise a partir da qual se busca derivar a política de manutenção mais adequada.

Quanto maior o nível de informação, maior a acurácia dos resultados da otimização. Ding & Kamaruddin (2015) classificam os modelos aplicados a otimização da manutenção em três categorias, de acordo com os níveis de certeza das informações por eles consideradas: certeza, risco e incerteza.

Na categoria certeza, encontram-se os modelos determinísticos, ou seja, modelos que consideram que há apenas um estado da natureza possível para cada estratégia; logo, a disponibilidade de informações é completa e o conhecimento, perfeito. Nos modelos incluídos na categoria risco, os estados da natureza são conhecidos e podem ser descritos através de distribuições de probabilidade. Já na categoria incerteza, os estados da natureza possíveis de serem vivenciados não são conhecidos; nesse caso, para dar prosseguimento ao processo de otimização, usualmente faz-se necessário o uso de abordagens de elicitación do conhecimento de especialistas. Ainda na categoria incerteza, podem ser incluídos métodos de apoio a decisão multicritério, que permitem agregar critérios com métricas diferentes, e por vezes conflitantes,

de acordo com a estrutura de preferências do decisor (DING & KAMARUDDIN, 2015; DE ALMEIDA *et al.*, 2015b).

De forma geral, o processo de otimização da manutenção pode ser dividido em duas partes principais: primeiro, se estabelece uma ferramenta de análise que permite estimar o desempenho de uma política de manutenção aplicada a um determinado sistema, em função das suas variáveis de decisão. Para esta fase, alternativas frequentemente encontradas na literatura são modelos matemáticos analíticos e modelos de simulação. Estabelecida uma ferramenta de análise, é possível então a aplicação de métodos de otimização para a busca de soluções. Os métodos de otimização podem ser exatos, aproximados ou heurísticos; sendo que neste último caso, não é possível fazer afirmações sobre a qualidade da solução encontrada, mas certamente se trata de uma solução boa (HORENBEEK, PINTELON & MUCHIRI, 2010; HILLIER & LIEBERMAN, 2006).

Modelos matemáticos analíticos são modelos abstratos que usam linguagem matemática para descrever um sistema. Usualmente são desenvolvidos a partir de um conjunto de pressupostos, que representam uma simplificação do cenário real, porém, apresentam a vantagem de que normalmente é possível o uso de métodos de otimização exatos ou aproximados (DING & KAMARUDDIN, 2015; AVEN & JENSEN, 1999).

Já modelos de simulação são boas alternativas para a análise de sistemas complexos, visto que buscam reproduzir as operações de um sistema real com o avanço do tempo; em contrapartida, são mais difíceis de incorporar a métodos de otimização das variáveis de decisão, sendo comum o uso de métodos heurísticos (ALRABGHI & TIWARI, 2015).

A modelagem matemática busca representar a realidade de forma aproximada, não sendo capaz de cobrir todos os seus aspectos, porém pode ser uma ferramenta muito útil para guiar a tomada de decisões na manutenção (AVEN & JENSEN, 1999).

### 2.1.3 Medidas de confiabilidade

A modelagem do processo de deterioração de componentes e sistemas provê informações importantes para os modelos de otimização da manutenção. Tais dados providenciam as informações básicas a partir das quais todas as decisões sobre quando realizar as ações de manutenção serão tomadas (HORENBEEK, PINTELON & MUCHIRI, 2010).

Nakagawa (2005) destaca as seguintes medidas de confiabilidade:

- $R(t)$  – Confiabilidade: é a função que descreve a probabilidade de que um sistema realize uma função requerida, sob determinadas condições, por um período de tempo  $t$ .

Considerando que o tempo até a falha de um sistema é uma variável aleatória não negativa, seu comportamento pode ser descrito por meio de uma função densidade de probabilidade  $f(t)$ . A função  $R(t)$  pode então ser obtida a partir da função  $f(t)$  de acordo com a equação (2.1).

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(u) du \quad (2.1)$$

- $\lambda(t)$  – taxa de falha: é a medida que permite avaliar o comportamento de um sistema diante do envelhecimento.

A função taxa de falha representa uma probabilidade condicional: dado que um sistema se encontra em estado operacional com uma idade  $t$ , a probabilidade de que ocorra uma falha dentro de um intervalo de tempo  $\Delta t$  pode ser aproximadamente calculada como  $\lambda(t) \cdot \Delta t$  (para valores pequenos e não negativos de  $\Delta t$ ). A função taxa de falha pode ser derivada da função confiabilidade, conforme a equação (2.2).

$$\lambda(t) = f(t) / R(t) \quad (2.2)$$

- Disponibilidade: pode ser abordada de diferentes formas, conforme apresentado abaixo:
  - a)  $A(t)$  – disponibilidade pontual: probabilidade de que o sistema esteja operando num determinado instante de tempo.
  - b)  $A(t, t + \Delta t)$  – disponibilidade em um intervalo: proporção esperada de um dado intervalo de tempo em que o sistema esteja operacional.
  - c)  $A$  – disponibilidade em longo prazo: proporção de tempo esperada, em longo prazo, em que o sistema esteja operacional.
- $M(t)$  – manutenibilidade: considerando que o tempo necessário para a manutenção pode ser uma variável aleatória e não negativa, esta é a função que descreve a probabilidade de que uma ação de manutenção possa ser concluída dentro de um intervalo de tempo  $t$ .

#### 2.1.4 O conceito *delay-time*

Quando se busca modelar o processo de deterioração de um componente ou sistema, um ponto importante é determinar quantos estados distintos, e possíveis de verificar, podem ser

observados antes da ocorrência da falha. A informação do estado de deterioração do sistema pode ser um fator importante na tomada de decisão sobre manutenção.

O conceito de *delay-time* considera que o processo de falha ocorre em dois estágios: antes da ocorrência da falha, que impossibilita a sua operação, o sistema apresenta um estado de defeito no qual ainda se encontra operacional, porém apresenta desvios das suas condições normais de operação, que podem ser indícios de falha iminente. O tempo transcorrido entre a chegada do defeito e a falha é chamado de *delay-time* (WANG, 2012).

A análise do *delay-time* tem apresentado importantes contribuições para modelos de políticas de inspeção. Se uma inspeção for realizada no decorrer do *delay-time*, o defeito pode ser identificado e ações de manutenção podem ser realizadas antes da ocorrência da falha, com menor custo e menor impacto na operação. Dessa forma, o *delay-time* representa uma janela de oportunidade para identificação e remoção do defeito (CHRISTER & WALLER, 1984; WANG, 2012).

Para a modelagem do processo de deterioração, informações mais complexas sobre o comportamento do sistema são requeridas para estimação das distribuições de probabilidade do tempo até a chegada do defeito ( $x$ ) e do *delay-time* ( $h$ ). Considerando as dificuldades para obtenção das informações necessárias para modelos dessa natureza, Baker & Wang (1992) apresentam um procedimento para estimação dessas distribuições a partir de dados históricos objetivos, e Wang (1997), por sua vez, apresenta um método para estimação subjetiva da função distribuição de probabilidade do *delay-time*.

Modelos *delay-time* exploram a relação entre o estado de deterioração do sistema, que pode ser verificado através de inspeções, e o seu *status* operacional, que diz respeito a sua capacidade de exercer uma função requerida (WANG, 2012). Na Figura 2 é apresentada uma representação do *delay-time* para um sistema com três estados possíveis.

A modelagem do *delay-time* também pode ser aplicada a sistemas com mais de três estados distintos e possíveis de serem identificados (WANG, 2012).

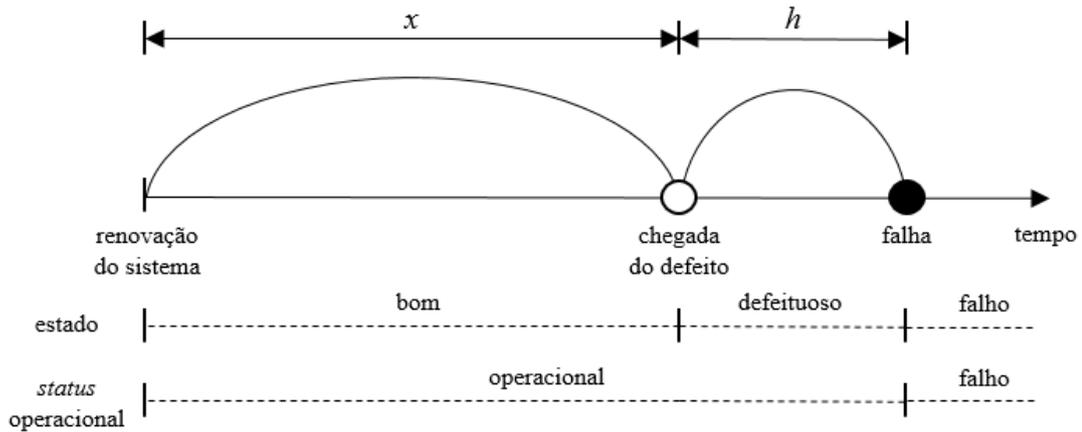


Figura 2 – Representação do delay-time.  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

### 2.1.5 Sistemas de prontidão

Sistemas de prontidão, tais como alarmes, sistemas de proteção contra incêndios, desfibriladores e sistemas de defesa militar, usualmente permanecem inativos durante os períodos de operação normal do sistema produtivo principal, e o seu funcionamento é requerido somente diante da ocorrência de uma demanda específica, como eventos de emergência. Conseqüentemente, tais sistemas apresentam falhas ocultas, que só podem ser detectadas numa emergência ou através de inspeções periódicas. Em geral, verifica-se que uma demanda não contida por conta de um sistema de prontidão indisponível pode ter efeitos bastante negativos, o que justifica a preocupação com o planejamento adequado da sua manutenção (VAURIO, 1999; JIA & CHRISTER, 2002; CAVALCANTE, SCARF & DE ALMEIDA, 2011).

Políticas de inspeção são adequadas para sistemas de prontidão, mesmo para casos com apenas dois estados possíveis de serem identificados: operacional e falho. Isso se justifica pois, diferentemente do caso de sistemas principais, a transição para o estado de falha não é verificada de forma imediata, pois não há interrupção do processo produtivo principal. Nesse sentido, de forma a garantir que sistemas de prontidão apresentem um nível satisfatório de disponibilidade, alguns trabalhos propõem que estes sejam submetidos a políticas de inspeção periódica (VAURIO, 1999; BERRADE, CAVALCANTE & SCARF, 2012; BERRADE, SCARF & CAVALCANTE, 2015).

Ao se definir uma política de inspeção pura para um sistema de prontidão com apenas dois estados possíveis e que se deteriora ao longo do tempo, invariavelmente haverá um nível de indisponibilidade do sistema, uma vez que o mesmo permanece em estado de falha até que

tal condição seja identificada em inspeção e então programada a ação de manutenção, com caráter corretivo. Já em contextos onde é possível identificar estados intermediários de defeito, é possível alcançar um maior nível de disponibilidade, visto que com a detecção de um estado defeituoso na inspeção, imediatamente pode ser programada a manutenção preventiva antes da ocorrência da falha (JIA & CHRISTER, 2002; CAVALCANTE, SCARF & DE ALMEIDA, 2011).

Uma forma de reduzir este efeito negativo sobre a disponibilidade do sistema é empregar uma política mista de inspeção e manutenção preventiva (CAVALCANTE, SCARF & DE ALMEIDA, 2011). Alberti *et al.* (2017) apresentam um modelo *delay-time* para uma política mista, e em seu estudo de caso evidenciam que uma política que considere a realização de manutenção preventiva em caso de identificação de defeito apresenta melhores resultados que uma política que considera a manutenção apenas em caso de identificação de falha, mesmo que a probabilidade de erro de julgamento na identificação do estado de defeito seja elevada.

Um dos indicadores chave para avaliar o desempenho de uma política de manutenção aplicada a um sistema de prontidão é o nível de disponibilidade deste. A disponibilidade indica o quanto um sistema de prontidão é capaz de conter a ocorrência de demandas. Nesse sentido, Vaurio (1995) e Jia & Christer (2002) apresentam modelos para definição do intervalo ótimo entre inspeções, de modo a maximizar a disponibilidade do sistema; porém, ao não considerar a frequência da ocorrência de demandas e as consequências associadas a sua não contenção, tais modelos podem resultar em políticas sobredimensionadas.

Vaurio (1999), Cavalcante, Scarf & De Almeida (2011), Berrade, Cavalcante & Scarf (2012), Berrade, Scarf & Cavalcante (2015) e Alberti *et al.* (2017), por sua vez, apresentam modelos que consideram a frequência de ocorrência de demandas e o custo associado a demandas não atendidas, com o objetivo de definir a política de manutenção ótima que minimize o custo esperado em longo prazo. Os modelos propostos apresentam uma caracterização do ciclo de renovação esperado em longo prazo como função das variáveis de decisão da política de manutenção, e a partir do *downtime* esperado se faz uma estimativa do custo decorrente de demandas não atendidas por unidade de tempo, que é acrescido ao custo esperado das ações de manutenção, resultando no critério de otimização.

Alberti *et al.* (2017) chamam a atenção para a necessidade de um mapeamento dos aspectos operacionais do sistema de prontidão quando da aplicação de um modelo para otimização da manutenção. Em alguns contextos, o tempo necessário a realização de ações de

inspeção e manutenção do sistema configura como um *downtime* (como no caso de alarmes e desfibriladores), enquanto em outros, representa uma indisponibilidade do sistema principal, e conseqüentemente uma interrupção no processo de chegada de demandas (a exemplo de um freio de emergência, que não pode ser inspecionado ou mantido quando o veículo se encontra em operação, e não está sujeito a demandas quando o veículo se encontra parado). Os autores apresentam um modelo flexível, que pode ser facilmente alterado a fim de representar contextos diversos.

Um resumo dos modelos apresentados nos artigos citados é exibido na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo dos modelos apresentados nos artigos citados.

Referência	Política de manutenção	Modelo de deterioração	Critério de otimização
Vaurio (1995)	Inspeção pura	Dois estados	Disponibilidade
Vaurio (1999)	Mista*	Dois estados	Custo
Jia & Christer (2002)	Inspeção pura	<i>Delay-time</i>	Disponibilidade
Cavalcante, Scarf & De Almeida (2011)	Mista*	<i>Delay-time</i>	Custo
Berrade, Cavalcante & Scarf (2012)	Mista*	Dois estados	Custo
Berrade, Scarf & Cavalcante (2015)	Mista*	Dois estados	Custo
Alberti <i>et al.</i> (2017)	Mista*	<i>Delay-time</i>	Custo

\* Política mista de inspeção e manutenção preventiva.

Fonte: Esta pesquisa (2017).

### 2.1.6 Qualidade da manutenção

A problemática da qualidade da manutenção está estreitamente ligada a questão do planejamento de recursos. Normalmente, após a definição da política de manutenção, busca-se uma adequação dos recursos a fim de viabilizar a sua execução; porém, na prática algumas limitações podem ser verificadas, especialmente no que concerne a qualidade dos recursos empregados. Ao se considerar informações sobre a qualidade da manutenção desde o início do

processo de planejamento da manutenção, orientações diferentes, e por vezes não triviais, podem ser obtidas para definição da política mais adequada (DE ALMEIDA *et al.*, 2015b; ALBERTI *et al.*, 2017).

Nesse sentido, alguns trabalhos têm apresentado modelos que permitem incorporar informações sobre aspectos diversos de qualidade da manutenção, e proposto políticas de diferentes formatos que permitem lidar com estes fatores de melhor maneira.

Para modelar a qualidade da substituição de um componente, Scarf *et al.* (2009) consideram que os componentes provêm de uma população heterogênea, composta por itens fracos, sujeitos a falhas precoces e com uma vida característica curta, e itens fortes, sujeitos a desgaste com o tempo e com uma vida característica mais longa. A fonte de tal heterogeneidade pode ser a variação de qualidade da fabricação (ou recuperação) do componente, a variação na qualidade da instalação ou ambas (BERRADE, CAVALCANTE & SCARF, 2012). Os autores afirmam que, neste caso, a distribuição de probabilidade da confiabilidade dos componentes pode ser bem modelada por uma mistura das distribuições de probabilidade características dos itens fracos e itens fortes. A mesma abordagem é utilizada posteriormente por Cavalcante, Scarf & De Almeida (2011), Scarf & Cavalcante (2012), Berrade, Cavalcante & Scarf (2012), Berrade, Scarf & Cavalcante (2015), Alberti *et al.* (2017).

Scarf *et al.* (2009) e Scarf & Cavalcante (2012) apresentam modelos *delay-time* para sistemas principais, e modelam a distribuição de probabilidade do tempo até a chegada do defeito como uma mistura das distribuições características dos itens fracos e itens fortes. Os autores propõem uma política mista de inspeção e substituição preventiva ( $K\Delta T$ ) que prevê a realização de inspeções na fase inicial de operação do componente, a fim de aumentar as chances de identificação e substituição de itens fracos antes da ocorrência da falha; passado esse período, as inspeções são suspensas e o componente permanece em operação até a substituição preventiva programada, ou até a falha, o que ocorrer primeiro. A política apresenta, então, três variáveis de decisão: o número de inspeções a serem realizadas ( $K$ ), o intervalo de tempo entre as inspeções ( $\Delta$ ) e o intervalo de tempo até a substituição preventiva ( $T$ ). Desse modo, este modelo permite a obtenção de uma política mais eficiente, que reduz as possibilidades de falhas precoces devido a itens fracos, sem acarretar o desperdício da vida útil dos itens fortes.

Scarf & Cavalcante (2012) apresentam um cenário em que as inspeções podem resultar na indução de defeito no sistema. Os autores então propõem uma forma de modelar este aspecto

de qualidade, incorporando ao modelo um parâmetro referente a probabilidade de haver indução de defeito na inspeção. Neste cenário, a chegada do defeito pode ocorrer, então, devido ao desgaste natural ou decorrente de uma inspeção ruim.

Em uma aplicação do modelo, Scarf & Cavalcante (2012) verificaram que, se a probabilidade de haver indução de defeito não for inferior a um nível muito baixo, os impactos no desempenho econômico tendem a ser significativos, de forma que, em alguns casos, é recomendável abdicar da prática de inspeções e adotar uma política de substituição preventiva pura. Os autores chamam a atenção para o seguinte comportamento comumente observado na prática: quando os gestores de manutenção não têm ciência das ocorrências de indução de defeito, sua resposta ao aumento da frequência de eventos de falha precoce tende a ser a programação de mais inspeções com um intervalo de tempo menor entre elas, o que acaba contribuindo para a piora do cenário.

Berrade, Cavalcante & Scarf (2012) e Berrade, Scarf & Cavalcante (2015) apresentam modelos de políticas de inspeção para sistemas de prontidão com apenas dois estados possíveis (operacional e falho). Cavalcante, Scarf & De Almeida (2011) e Alberti *et al.* (2017), por sua vez, apresentam modelos *delay-time* também aplicados a sistemas de prontidão.

Cavalcante, Scarf & De Almeida (2011) e Berrade, Cavalcante & Scarf (2012) propõem um formato de política mista de inspeção e substituição preventiva em duas fases ( $M_1, T_1, M_2, T_2$ ), que prevê a realização de inspeções mais frequentes na fase inicial de operação do sistema, a fim de aumentar as chances de identificação de componentes fracos, sem grande impacto na disponibilidade do sistema; passado esse período, as inspeções continuam a ser realizadas, porém com uma frequência menor. A política apresenta, então, quatro variáveis de decisão: o número de inspeções na primeira fase ( $M_1$ ) e o intervalo de tempo entre elas ( $T_1$ ), e o número de inspeções na segunda fase ( $M_2$ ) e o intervalo de tempo entre elas ( $T_2$ ). Em ( $M_1, T_1 + M_2, T_2$ ) é programada a substituição preventiva.

Já Berrade, Scarf & Cavalcante (2015) e Alberti *et al.* (2017), observando a importância de uma política simples e fácil de ser executada, consideram uma política mista de inspeção e substituição preventiva ( $MT$ ), porém com inspeções realizadas em intervalos regulares. No formato proposto inicialmente por Vaurio (1999), a política apresenta duas variáveis de decisão: o número máximo de inspeções até a substituição preventiva ( $M$ ) e o intervalo de tempo entre elas ( $T$ ).

Berrade, Cavalcante & Scarf (2012) e Berrade, Scarf & Cavalcante (2015) apresentam um cenário em que as inspeções estão sujeitas a erros de julgamento com relação a identificação do estado de falha do sistema. Os autores modelam este aspecto de qualidade considerando as probabilidades de ocorrer falso positivo (falso alarme) ou falso negativo (não identificação do estado de falha).

Os eventos de falso negativo têm um impacto significativo na disponibilidade do sistema, visto que contribuem para que o mesmo permaneça mais tempo em estado de falha, susceptível a ocorrência de demandas. Já os eventos de falso positivo podem representar um desperdício na vida útil do componente, e seu impacto sobre a confiabilidade do sistema é potencializado quando combinado com os efeitos de uma população de componentes heterogênea: na ocorrência de um falso positivo, um item forte pode ser substituído precocemente e por um item fraco (BERRADE, SCARF & CAVALCANTE, 2015).

Alberti *et al.* (2017), por sua vez, apresentam um cenário em que as inspeções estão sujeitas a erro de julgamento com relação a identificação do estado de defeito, e também podem ocasionar indução ao estado defeituoso. Os autores aplicam o modelo a um estudo de caso e verificam que, mesmo em níveis baixos, a probabilidade de indução de defeito tem um grande impacto no desempenho da política de manutenção, e o modelo é bastante sensível a este parâmetro. Tal impacto é potencializado quando combinado aos efeitos dos erros de julgamento: com um defeito induzido precocemente e não detectado em inspeções, aumenta a probabilidade de falha do sistema.

O estudo demonstra a importância de uma investigação profunda das tendências que afetam o desempenho do sistema, uma vez que alguns tipos de evento, mesmo que pouco observados, podem ter um impacto significativo, como no caso da indução de defeito. Os autores também aplicam o modelo de forma a evidenciar que o investimento em manutenção de maior qualidade, mesmo que aparente ser mais custoso no primeiro momento, pode ser uma alternativa mais econômica no longo prazo (ALBERTI *et al.*, 2017).

Um resumo dos modelos apresentados nos artigos citados é exibido na Tabela 2:

Tabela 2 – Resumo dos modelos apresentados nos artigos citados.

Referência	Tipo de sistema	Política	Modelo de deterioração	Aspectos de qualidade abordados
Scarf <i>et al.</i> (2009)	Principal	$K\Delta T$	<i>Delay-time</i>	- Qualidade da substituição
Scarf & Cavalcante (2012)	Principal	$K\Delta T$	<i>Delay-time</i>	- Qualidade da substituição - Indução de defeito
Cavalcante, Scarf & De Almeida (2011)	Prontidão	$M_1T_1$ $M_2T_2$	<i>Delay-time</i>	- Qualidade da substituição
Berrade, Cavalcante & Scarf (2012)	Prontidão	$M_1T_1$ $M_2T_2$	Dois estados	- Qualidade da substituição - Erro de julgamento
Berrade, Scarf & Cavalcante (2015)	Prontidão	$MT$	Dois estados	- Qualidade da substituição - Erro de julgamento
Alberti <i>et al.</i> (2017)	Prontidão	$MT$	<i>Delay-time</i>	- Qualidade da substituição - Erro de julgamento - Indução de defeito

Fonte: Esta pesquisa (2017).

## 2.2 Risco

Na literatura são apresentadas diversas definições para o conceito de risco, que podem variar conforme a aplicação e os objetivos da análise proposta. Porém, o conceito básico de risco está associado com a incerteza em um ambiente, que por sua vez está relacionada a probabilidade de ocorrência de um evento indesejado e o impacto resultante. O gerenciamento do risco pode, então, ser realizado em duas direções principais: reduzir a probabilidade de ocorrência de um evento indesejado, e reduzir os impactos decorrentes de tais ocorrências (COX, 2009; DE ALMEIDA *et al.*, 2015b).

Aven (2012) apresenta uma revisão de definições apresentadas na literatura para o conceito de risco, e diferencia abordagens que tratam o risco como uma medida quantitativa de abordagens que o tratam como um conceito qualitativo. Enquanto medida quantitativa, destaca-se uma definição de risco como a probabilidade de ocorrência de um evento indesejado, proveniente de um certo acaso, dentro de um período de tempo especificado ou em circunstâncias específicas.

Em alguns contextos, especialmente quando há questões de segurança humana ou ambiental envolvidas, os limites de risco aceitáveis são definidos por regulamentação. O

princípio ALARP (*As Low as Reasonably Practicable*) pode ser entendido como uma meta de risco a ser alcançada, a fim de definir investimentos em segurança. De acordo com este princípio, é possível classificar riscos em três categorias: risco negligenciável, risco tolerável e risco inaceitável. A região de risco tolerável (ALARP) inclui riscos os quais usualmente seria preferível não ter, mas que são assim considerados em função dos ganhos obtidos ao aceitar tal situação (análise de custo-benefício) (DE ALMEIDA *et al.*, 2015b). O princípio ALARP pode ser ilustrado conforme a Figura 3.

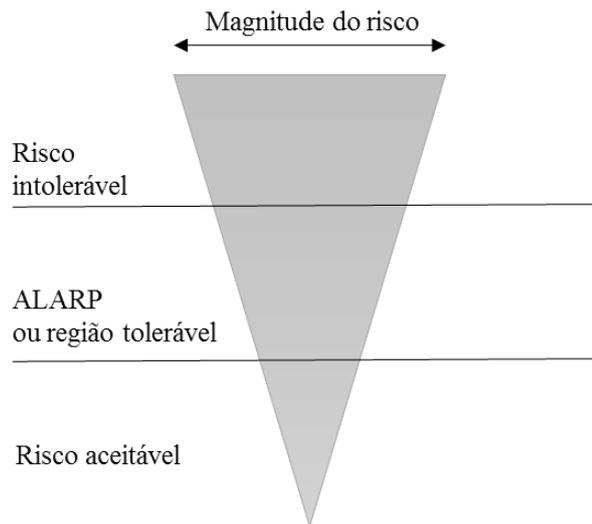


Figura 3 – Princípio ALARP: limites de tolerância.  
Fonte: Adaptado de De Almeida *et al.* (2015b).

Falhas de sistemas são eventos indesejados, e dependendo do contexto, podem ter impactos significativos e em dimensões múltiplas. O caso dos sistemas de prontidão é um bom exemplo: projetados para conter eventos de emergência, a sua falha pode representar a amplificação do impacto resultante de tais ocorrências. Dessa forma, fica evidente que o gerenciamento da manutenção e o gerenciamento de risco possuem uma estreita relação (como abordado, por exemplo, por SOUSA, LOPES & GARCEZ, 2017).

De Almeida *et al.* (2016) destacam que, em muitos casos reais, o risco pode representar impactos em múltiplas dimensões, tais como as dimensões ambiental, humana, financeira e técnica de uma dada situação. Então, mesmo que a realização de *trade-offs* entre tais dimensões seja um assunto complexo, e por vezes polêmico, tal procedimento é possível de ser realizado com o uso de métodos de apoio a decisão multicritério.

### 2.3 Redes de distribuição de água

As funções básicas dos operadores de sistemas de abastecimento de água envolvem a obtenção de água de uma fonte, seu tratamento de modo a alcançar uma qualidade aceitável e fornecimento na quantidade e pressão requeridas, no lugar certo e no tempo apropriado (MAYS, 2000).

Sistemas de abastecimento de água, em geral, possuem os seguintes componentes funcionais principais: o sistema de captação da água da fonte, os sistemas de transporte e armazenamento (de água bruta e de água tratada), as estações de tratamento e a rede de distribuição (MAYS, 2000; HELLER & PÁDUA, 2006). Na Figura 4 são identificados os principais componentes funcionais de um sistema de abastecimento de água.

De acordo com a norma NBR 12218/1994, a rede de distribuição é uma parte do sistema de abastecimento de água formada por tubulações e órgãos acessórios, cujo objetivo principal é disponibilizar água potável para os consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendadas. Sendo o componente mais dispendioso do sistema de abastecimento (para construção e manutenção), seu gerenciamento tem sido um dos grandes desafios enfrentados pelas cidades atualmente, especialmente em consequência do aumento de sua complexidade, da elevação da taxa de deterioração das tubulações e da presença de ameaças externas de naturezas diversas (KLEINER, ADAMS & ROGERS, 1998; AGATHOKLEOUS, CHRISTODOULOU & CHRISTODOULOU, 2017).

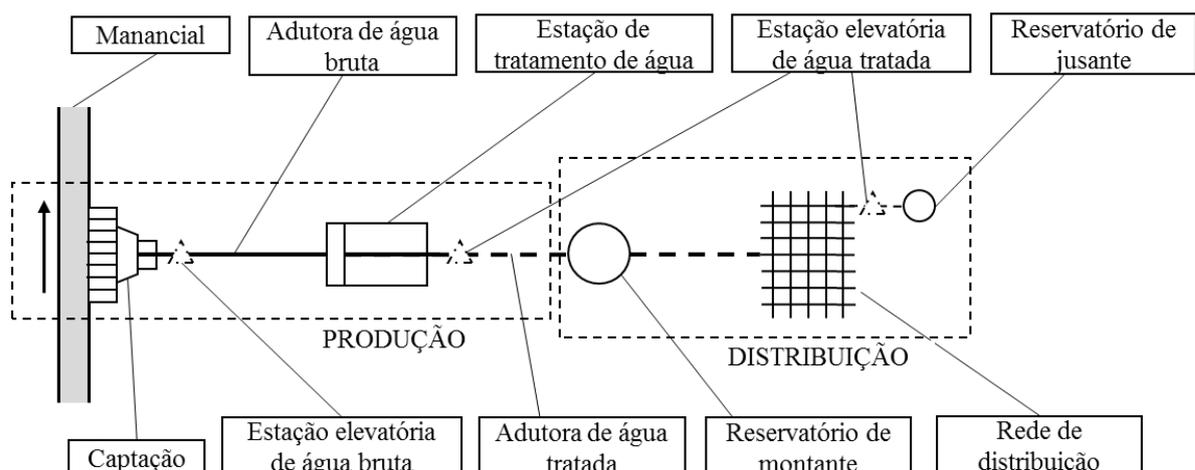


Figura 4 – Unidades componentes de um sistema de abastecimento de água.  
Fonte: Heller & Pádua (2006).

Como resultado, tem sido cada vez mais importante o uso de ferramentas para avaliação da confiabilidade de redes de distribuição de água, de forma a dar suporte para a tomada de decisões considerando este aspecto. A confiabilidade de uma rede de distribuição de água pode ser entendida como a sua capacidade de exercer sua função primária: disponibilizar água na quantidade e pressão necessárias para atender a demanda (KIM & MAYS, 1994; AGATHOKLEOUS, CHRISTODOULOU & CHRISTODOULOU, 2017).

### 2.3.1 Válvulas de isolamento

Válvulas de isolamento (também conhecidas como válvulas de fechamento ou válvulas de manobra) desempenham um papel importante em redes de distribuição de água, visto que possibilitam o isolamento de segmentos da rede, procedimento este necessário em algumas ocasiões, como reparo de tubulações quebradas ou confinamento de substâncias contaminantes dentro de uma área de controle (JUN *et al.*, 2007). Walski (1993) define como “segmento” a menor área de uma rede distribuição de água, cujo abastecimento pode ser interrompido com o fechamento de válvulas, sem afetar o restante do sistema; já a norma NBR 12218/1994 denomina “segmento” como “setor de manobra”.

As válvulas de isolamento são elementos importantes para prover confiabilidade a redes de distribuição de água. Em uma rede sem válvulas de isolamento, qualquer reparo de tubulação incorre na interrupção do abastecimento de água em toda a rede; já no sentido contrário, ao aumentar a quantidade de válvulas é possível alcançar maior nível de confiabilidade, porém o custo associado apresenta-se como uma restrição para a determinação da quantidade e localização das válvulas (WALSKI, 1993).

A norma NBR 12218/1994 estabelece que o setor de manobra deve abranger uma área que apresente uma ou mais das seguintes características: a) extensão de rede entre 7.000 e 35.000 metros; b) entre 600 e 3.000 economias e c) área entre 40.000 e 200.000 m<sup>2</sup>. Além disso, recomenda-se que o isolamento do setor deve ser feito pelo menor número de válvulas possível.

Mesmo que existam algumas orientações normativas, diversos trabalhos têm dado atenção para o desenvolvimento de métodos que visam auxiliar na definição da melhor configuração do sistema de válvulas de isolamento, a fim de melhorar a confiabilidade da rede de distribuição (WALSKI, 1993; JUN *et al.*, 2007; GIUSTOLISI & SAVIC, 2010; CREACO, FRANCHINI & ALVISI, 2010; FONTANA & MORAIS, 2015). Porém, conforme observado por Liu *et al.* (2017), com exceção de poucos trabalhos, em geral o impacto da falha das válvulas não tem sido considerado.

Apesar de o projeto de redes de distribuição de água ser concebido de forma a, ao menos, respeitar restrições normativas, na prática as válvulas de isolamento podem se apresentar inoperáveis por uma série de fatores que vão além da falha do equipamento, como omissão da localização ou dificuldade de acesso para operação e conserto. Isso aumenta a importância relativa de algumas válvulas para a confiabilidade do sistema, e os segmentos possíveis de isolar, na prática, podem abranger áreas maiores que as delimitadas inicialmente (LIU *et al.*, 2017; ALBERTI *et al.*, 2017).

Nesse sentido, alguns trabalhos apresentam métodos que permitem avaliar o impacto das falhas de válvulas de isolamento, contribuindo para a identificação das unidades mais críticas, dando apoio a decisões sobre sua operação e manutenção (JUN *et al.*, 2008; GIUSTOLISI, KAPELAN & SAVIC, 2008; LIU *et al.*, 2007).

Marlow, Beale & Mashfort (2012), por sua vez, apresentam um método baseado em análise de risco para priorização da inspeção de válvulas de isolamento. Os autores destacam a importância de um programa de inspeções com vista a aumentar a confiabilidade do sistema de válvulas; contudo, identificam que muitas empresas não possuem um programa que estabelece um padrão para esta prática, incorrendo no risco de que os problemas de confiabilidade das válvulas de isolamento se tornem generalizados.

Mais recentemente, Alberti *et al.* (2017) identificam que, devido a suas características operacionais, as válvulas de isolamento podem ser classificadas como sistemas de prontidão. As demandas do sistema são qualquer evento que implique na necessidade de isolamento de um segmento da rede de distribuição de água, e na análise apresentada são consideradas demandas de dois tipos principais: vazamentos e contaminação. Baseando-se nisso, os autores propõem um modelo matemático para determinação da política de manutenção ótima para válvulas de isolamento, com base no critério custo.

Dado o seu impacto sobre a confiabilidade do sistema de distribuição de água, as válvulas de isolamento podem ser tratadas como componentes estratégicos; portanto, é importante manter a sua confiabilidade em níveis satisfatórios, e para tal é imprescindível a adoção de políticas de manutenção adequadas aos objetivos da operação.

## **2.4 Decisão multicritério**

Um problema de decisão multicritério (MCDM – *multi-criteria decision-making*) consiste numa situação em que há pelo menos duas alternativas de ação para se escolher, e essa

escolha é conduzida com o objetivo de atender a múltiplos objetivos, por vezes conflitantes entre si (DE ALMEIDA, FERREIRA & CAVALCANTE, 2015).

Um objetivo indica uma “direção” na qual a organização busca avançar, um aspecto de sua operação que se busca melhorar. Critério (ou atributo), por sua vez, é uma variável compreensível e mensurável, utilizada para descrever as consequências de um determinado curso de ação, de forma que o decisor possa ter um bom entendimento do quanto um objetivo é alcançado. Os objetivos e critérios considerados em um problema de decisão preferencialmente devem ser derivados de um objetivo geral, estratégico, e sua definição normalmente envolve criatividade e este processo pode ser conduzido através de métodos estruturados (KEENEY & RAIFFA, 1976). Os termos critério e atributo, neste trabalho apresentam o mesmo significado, e seu uso pode variar de acordo com o assunto em discussão.

Abordagens MCDM diferem de abordagens multiobjetivo pois consideram a estrutura de preferências de um decisor, de modo a determinar a melhor relação de compromisso entre os objetivos do problema. Para tal, os critérios são combinados a partir da avaliação subjetiva do decisor. Vale ressaltar que essa subjetividade é parte inerente do problema, e não pode ser eliminada do processo sem alterar a sua natureza (DE ALMEIDA, FERREIRA & CAVALCANTE, 2015).

O uso de modelos MCDM tem sido amplamente recomendado como forma de apoio para o processo decisório. Um modelo MCDM pode ser definido como uma representação formal e simplificada de um problema real enfrentado por um decisor, envolvendo múltiplos objetivos. O modelo deve ser elaborado de forma a incorporar a estrutura de preferências do decisor e os aspectos particulares do problema da maneira mais adequada, buscando o equilíbrio entre simplicidade e precisão (DE ALMEIDA *et al.*, 2015b).

De Almeida (2013) propõe o procedimento para construção de um modelo de decisão multicritério apresentado na Figura 5. O procedimento é dividido em três fases principais, e as etapas seguem a sequência indicada pelas setas. As linhas pontilhadas indicam que pode ser aplicada a abordagem de refinamentos sucessivos, a fim de melhorar os resultados obtidos.

A fase preliminar inclui a estruturação dos elementos básicos para a formulação do problema de decisão, e é fundamental para garantir que o decisor tenha um entendimento amplo sobre o contexto em questão. A segunda etapa envolve a modelagem da estrutura de preferências do decisor, e a escolha do método a ser utilizado. Por fim, com o modelo já

consolidado, são desenvolvidas as etapas para a resolução do problema e implementação das recomendações (DE ALMEIDA, 2013).

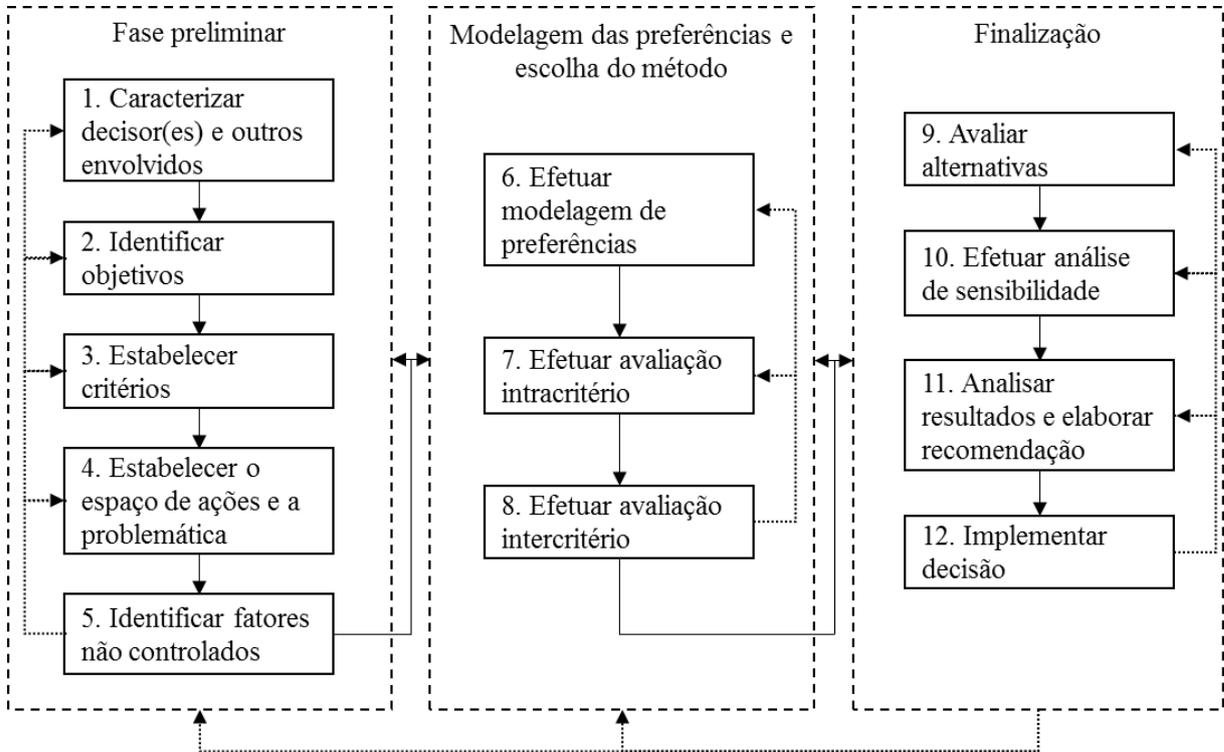


Figura 5 – Procedimento para construção de um modelo de decisão multicritério.  
Fonte: De Almeida (2013).

O contexto da decisão tem uma grande influência na estruturação do modelo, e o tipo de problema que está sendo tratado pode representar uma restrição para a escolha do método multicritério. Roy (1996) e De Almeida *et al.* (2015b) apresentam cinco categorias segundo as quais é possível classificar as problemáticas de decisão:

- **Problemática de escolha:** quando a decisão consiste na escolha de um subconjunto de alternativas dentre todo o espaço de ações de possíveis. O problema da otimização é um caso particular desta problemática.
- **Problemática de ordenação:** quando se busca comparar e ordenar as alternativas do espaço de ações da pior para a melhor.
- **Problemática de classificação:** quando se busca alocar as alternativas em categorias ou classes, conforme as consequências associadas a sua escolha.

- Problemática de descrição: quando se deseja auxiliar o processo de tomada de decisão por meio da apresentação de uma descrição apropriada das alternativas e suas consequências.
- Problemática de portfólio: quando a decisão consiste na escolha de um subconjunto de alternativas, buscando satisfazer os objetivos do problema e respeitando algumas restrições. Este tipo de problemática pode ser implementado com base no problema da mochila, diferentemente da problemática de escolha.

Adicionalmente, existe uma distinção com relação a estrutura de preferências do decisor, no que concerne a lógica de compensação entre critérios. Duas racionalidades são discriminadas: compensatória e não-compensatória. Os métodos compensatórios partem da premissa de que é possível haver compensação entre critérios; por outro lado, os métodos não-compensatórios não estabelecem uma lógica de compensação, e requerem uma informação que corresponde à relativa importância dos critérios (DE ALMEIDA, 2013).

Com relação aos métodos de apoio a decisão multicritério, uma forma de classificação considera três categorias principais (ROY, 1996; VINCKE, 1992):

- Métodos de critério único de síntese: são métodos compensatórios que buscam uma avaliação global das alternativas através da agregação do conjunto de critérios em um critério único de síntese.
- Métodos de sobreclassificação: são métodos não-compensatórios, que realizam comparações par a par entre as alternativas, explorando relações de sobreclassificação.
- Métodos interativos: consistem em alternar cálculos computacionais e diálogos com o decisor, de forma que sua estrutura de preferências possa ser incorporada ao processo de obtenção de uma solução.

Modelos MCDM têm contribuído de forma significativa para a tomada de decisões no contexto da manutenção, visto que, em muitos casos reais, não é possível especificar um critério único a ser otimizado, e os problemas de decisão são multifacetados. De Almeida, Ferreira & Cavalcante (2015) destacam que este cenário é bastante frequente em sistemas de produção de serviço, nos quais as consequências de um evento de falha são difíceis de mensurar em termos de custo. Os autores apresentam uma revisão sistemática do uso de modelos MCDM em manutenção e confiabilidade.

Diversos trabalhos também têm proposto o uso de modelos MCDM para apoio a decisão na gestão de recursos de sistemas de abastecimento de água. Considerando o impacto que tais

ações podem ter na sociedade de uma forma geral, os analistas têm começado a substituir a ideia de soluções ótimas pela noção de *trade-offs* eficientes entre objetivos conflitantes (FONTANA & MORAIS, 2015; TROJAN & MORAIS, 2015; MONTE & DE ALMEIDA-FILHO, 2016; LOUCKS, 2017).

#### 2.4.1 Teoria da utilidade multiatributo (MAUT)

A Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), desenvolvida para problemas MDCM, derivou da Teoria da Utilidade apresentada por von Neumann e Morgenstern em 1944, mantendo a sua estrutura axiomática (KEENEY & RAIFFA, 1976). Segundo De Almeida (2013), MAUT apresenta uma estrutura axiomática sólida e consistente para decisão multicritério, em contrapartida isso pode representar algumas restrições para a sua aplicação.

Uma das abordagens mais clássicas para modelos MCDM, MAUT considera uma racionalidade compensatória e propõe a avaliação das alternativas de ação a partir de um critério único de síntese: a utilidade multiatributo. A noção de utilidade pode ser descrita como uma forma de quantificar a satisfação de um indivíduo com relação as consequências de uma decisão. Um diferencial importante desta abordagem é que permite tratar adequadamente consequências de natureza probabilística (DE ALMEIDA, 2013).

Segundo De Almeida, Ferreira & Cavalcante (2015), MAUT é uma abordagem adequada para problemas MCDM nas áreas de manutenção e confiabilidade, em casos onde a racionalidade compensatória é compatível, visto que apresenta uma estrutura axiomática adequada para situações de incerteza, tal como se verifica nesse contexto.

Em MAUT, a modelagem de preferências é realizada em duas etapas: primeiro, a modelagem é realizada para cada critério individualmente para obter as suas funções utilidade unidimensionais; então, a modelagem é realizada a fim de obter a função utilidade multiatributo. A função utilidade multiatributo agrega as funções utilidade unidimensionais, conforme a equação (2.3) (DE ALMEIDA, 2012).

$$U(x_1, x_2, \dots, x_n) = f[U_1(x_1), U_2(x_2), \dots, U_n(x_n)] \quad (2.3)$$

$x_i$  – consequência relativa ao atributo  $X_i$

$U$  – utilidade multiatributo

$U_i$  – utilidade unidimensional para o atributo  $X_i$

$f$  – função de agregação

### 2.4.1.1 Utilidade unidimensional

Keeney & Raiffa (1976) indicam que o problema geral abordado pela Teoria da Utilidade Unidimensional é o seguinte: um decisor deve escolher entre várias alternativas, cada qual que eventualmente irá resultar em uma consequência descritível em termos de um determinado atributo. O decisor não sabe exatamente qual será consequência resultante da escolha de cada alternativa, mas possui conhecimento das distribuições de probabilidade das consequências possíveis de cada curso de ação. O que o decisor deve fazer?

Se uma utilidade apropriada é indicada para cada possível consequência e a utilidade esperada de cada alternativa é calculada, então o melhor curso de ação é a alternativa com a maior utilidade esperada.

A função utilidade unidimensional modela as preferências do decisor com relação a um atributo utilizando uma escala de referência normalizada, o que é particularmente importante para aplicação em MAUT. Esta função incorpora informações importantes a respeito do comportamento do decisor com relação ao risco (aversão, neutralidade ou propensão), e deve ser obtida através de um protocolo estruturado e fundamentado na estrutura axiomática da Teoria de Utilidade (DE ALMEIDA, 2013).

Para o processo de elicitación da função utilidade de um atributo, são muito importantes os conceitos de loteria e equivalente certo: uma loteria  $[A, p; B, 1-p]$  representa uma situação de risco em que há uma probabilidade  $p$  de obtenção da consequência  $A$  e uma probabilidade complementar de obtenção da consequência  $B$ . O equivalente certo da loteria é uma consequência certa  $C$ , para a qual o decisor se mostra indiferente entre a loteria e o equivalente certo, conforme representado na Figura 6. Desse modo, é plausível assumir que a utilidade do equivalente certo é igual a utilidade esperada da loteria (KEENEY & RAIFFA, 1976).

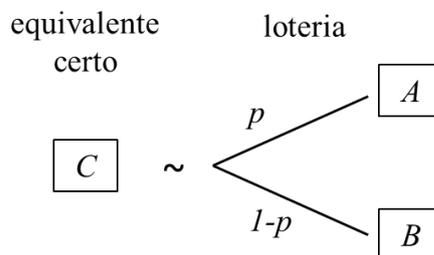


Figura 6 – Representação de loteria e equivalente certo.  
Fonte: Adaptado de Keeney & Raiffa (1976).

Com a aplicação de um protocolo de elicitaco, alguns pontos intermediários da funo utilidade podem ser identificados, e esta pode então ser estimada de modo a obter o melhor ajuste possível (DE ALMEIDA, 2013).

Para uma funo utilidade monotonicamente crescente, se o equivalente certo ( $C$ ) de uma loteria ( $L$ ) for menor que o seu valor esperado ( $E(L)$ ), conseqüentemente, a utilidade esperada da loteria ( $E[U(L)]$ )  menor que a utilidade do seu valor esperado ( $U[E(L)]$ ), o que indica que o decisor apresenta um comportamento de aversão ao risco. As condioes que caracterizam o comportamento de um decisor com relao ao risco são apresentadas de forma resumida na Tabela 3 (KEENEY & RAIFFA, 1976).

Tabela 3 – Caracterizao do comportamento do decisor com relao ao risco.

Funo utilidade	Equivalente certo	Utilidade da loteria	Comportamento do decisor com relao ao risco
Monot. crescente	$C < E(L)$	$E[U(L)] < U[E(L)]$	Aversão
Monot. crescente	$C = E(L)$	$E[U(L)] = U[E(L)]$	Neutralidade
Monot. crescente	$C > E(L)$	$E[U(L)] > U[E(L)]$	Propensão
Monot. decrescente	$C < E(L)$	$E[U(L)] > U[E(L)]$	Propensão
Monot. decrescente	$C = E(L)$	$E[U(L)] = U[E(L)]$	Neutralidade
Monot. decrescente	$C > E(L)$	$E[U(L)] < U[E(L)]$	Aversão

Fonte: Esta pesquisa (2017).

Keeney & Raiffa (1976) também propõe uma medida para avaliar o grau de aversão (ou propensão) ao risco do decisor, apresentada na equao (2.4) (assumindo que a funo utilidade  contínua e duas vezes diferenciável).

$$r(x) = -\frac{U''(x)}{U'(x)} \quad (2.4)$$

$r(x)$  – aversão local ao risco em  $x$

$U''(x)$  – derivada de segunda ordem da funo utilidade

$U'(x)$  – derivada de primeira ordem da funo utilidade

Esta funo permite avaliar algumas propriedades importantes. Se  $r$   uma funo constante, significa que o comportamento do decisor em relao ao risco  o mesmo para todo o espaço de conseqncias; em contrapartida, se o valor de  $r$  varia, significa que o comportamento do decisor varia de acordo com o cenário. Os aspectos do comportamento do

decisor com relação ao risco são relevantes na escolha do formato a ser utilizado para obter a função utilidade (KEENEY & RAIFFA, 1976).

#### 2.4.1.2 Utilidade multiatributo

A utilidade multiatributo representa as preferências de um decisor com relação a múltiplos atributos considerados em conjunto. Keeney & Raiffa (1976) afirmam que a função utilidade multiatributo pode ser obtida de forma direta; porém este procedimento pode ser muito trabalhoso e exigir muitos testes de consistência, dificultando a sua realização. Alternativamente, algumas formas funcionais de agregação das funções utilidade unidimensionais podem ser consideradas, desde que a estrutura de preferências do decisor seja compatível com alguns pressupostos.

Duas condições de independência preferencial devem ser validadas para definição da fórmula de agregação adequada: independência em utilidade e independência aditiva, definidas a seguir para o caso de dois atributos ( $X$  e  $Y$ ).

A independência em utilidade é definida da seguinte forma: o atributo  $X$  é independente em utilidade do atributo  $Y$  quando as preferências condicionais para loterias em  $X$ , dado  $y$ , não dependem do valor de  $y$ . A mútua independência em utilidade é a condição para uso da função de agregação multilinear, apresentada na equação (2.5) (KEENEY & RAIFFA, 1976; DE ALMEIDA, 2013).

$$U(x, y) = k_x \cdot U_x(x) + k_y \cdot U_y(y) + k_{xy} \cdot U_x(x) \cdot U_y(y) \quad (2.5)$$

$$k_x + k_y + k_{xy} = 1 \quad (2.6)$$

$k_x$ ,  $k_y$  e  $k_{xy}$  – constantes de escala

Já a condição de independência aditiva pode ser entendida da seguinte forma: se, para dados dois valores quaisquer e diferentes  $x_1$  e  $x_2$  para  $X$ , e  $y_1$  e  $y_2$  para  $Y$ , a relação de indiferença apresentada na Figura 7 é sempre verdadeira, os atributos  $X$  e  $Y$  apresentam a condição de independência aditiva (KEENEY & RAIFFA, 1976).

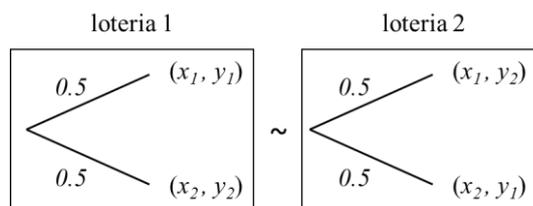


Figura 7 – Independência entre loterias característica da condição de independência aditiva.

Fonte: Adaptado de Keeney & Raiffa (1976).

A independência aditiva é a condição para uso da função de agregação aditiva, apresentada na equação (2.7).

$$U(x, y) = k_x \cdot U_x(x) + k_y \cdot U_y(y) \quad (2.7)$$

$$k_x + k_y = 1 \quad (2.8)$$

É importante ressaltar que tais condições devem ser verificadas mediante aplicação de um protocolo estruturado e com testes de consistência.

Verificadas as condições de independência preferencial e definido o modelo de agregação mais adequado para a função utilidade multiatributo, é necessário, então, determinar os valores das constantes de escala. Este procedimento é feito através da realização de *trade-offs* entre os atributos junto ao decisor, o que evidencia a racionalidade compensatória considerada em MAUT (DE ALMEIDA, 2013).

O processo de *trade-off* entre atributos para obtenção das constantes de escala pode exigir um alto nível de esforço cognitivo do decisor, estando sujeito a inconsistências. Observando este aspecto, De Almeida *et al.* (2015a) propõem um método flexível e iterativo, chamado *Fitradeoff*, que permite resolver problemas MCDM com um espaço de alternativas discreto, utilizando apenas informações parciais sobre a estrutura de preferências do decisor.

## 2.5 Síntese conclusiva

As informações levantadas neste capítulo permitem um conhecimento sobre os assuntos que são importantes para o desenvolvimento da presente pesquisa.

Sistemas de prontidão são de importância estratégica para a contenção de eventos de emergência, e a ocorrência de demandas não atendidas por conta de um sistema indisponível normalmente possui consequências bastante negativas, o que justifica a preocupação com o planejamento adequado da manutenção. Válvulas de isolamento utilizadas em redes de distribuição de água são um exemplo de sistema de prontidão, onde fica evidente que um evento de demanda não atendida pode ter impactos em múltiplas dimensões, tornando necessária uma abordagem multicritério para a devido tratamento do problema do planejamento da manutenção.

O artigo “Modelling inspection and replacement quality for a protection system” (ALBERTI *et al.*, 2018) apresenta alguns resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa de mestrado. O presente trabalho apresenta outras contribuições: primeiro, uma

contribuição para a modelagem matemática da política de manutenção considerando aspectos de qualidade da manutenção é demonstrada; e segundo, uma abordagem multicritério (baseada na aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo) é desenvolvida, evidenciando uma forma diferente de tratar o problema.

### 3 MODELO MATEMÁTICO – MOTIVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, o contexto que motivou o desenvolvimento deste trabalho é apresentado, e um novo modelo matemático é proposto para representação de uma política de manutenção aplicada a um sistema de prontidão, considerando aspectos diversos de qualidade da manutenção. Por fim, uma aplicação numérica é apresentada, com resultados sobre a otimização de dois critérios (custo e risco) separadamente.

#### 3.1 Contexto e sistema estudado

O desenvolvimento do modelo apresentado neste trabalho foi motivado por um estudo de caso sobre inspeção e manutenção de válvulas de isolamento utilizadas em sistemas de distribuição de água. O estudo foi realizado em uma empresa brasileira de saneamento.

Conforme verificado em revisão apresentada no capítulo anterior, válvulas de isolamento desempenham um papel importante em redes de distribuição de água, visto que possibilitam o isolamento de segmentos da rede, sem afetar a área restante. Tal procedimento é necessário em algumas circunstâncias, como reparo de tubulações quebradas ou confinamento de substâncias contaminantes dentro de uma área de controle.

Liu *et al.* (2017) observam que poucos trabalhos consideram o impacto das falhas de válvulas de isolamento na rede de distribuição de água, e em revisão da literatura, verifica-se que pouca atenção tem sido dedicada a investigação de estratégias de manutenção adequadas para este tipo de componente. Recentemente, Alberti *et al.* (2017) apresentaram um modelo para definição de políticas de manutenção ótimas para válvulas de isolamento, com base no critério custo. No presente trabalho, uma nova contribuição ao modelo apresentado por Alberti *et al.* (2017) é proposta, e uma abordagem multicritério é desenvolvida, incorporando outros aspectos do problema.

Para o planejamento da manutenção, primeiramente é necessário ter conhecimento sobre os aspectos operacionais e de falha do sistema em estudo, a fim de identificar quais tipos de ação são apropriados. Uma investigação detalhada, que busque identificar fatores que impactam no desempenho do sistema e da manutenção, pode prover informações importantes para esse processo. Os principais aspectos observados no estudo de caso são apresentados nas subseções a seguir.

### 3.1.1 Aspectos operacionais

Conforme observado por Alberti *et al.* (2017), por conta de suas características de operação, válvulas de isolamento podem ser classificadas como sistemas de prontidão. Neste caso, as demandas podem ser entendidas como qualquer evento que implique na necessidade de isolamento de um segmento da rede de distribuição. Este é um ponto que diferencia a operação das válvulas de isolamento da operação das bombas hidráulicas, por exemplo, pois no segundo caso, quando o equipamento falha, os efeitos podem ser observados de forma quase imediata devido ao impacto no sistema de distribuição, com a redução da pressão da água.

Quando ocorre algum evento que resulte na necessidade de isolamento de um segmento da rede e as válvulas requisitadas se encontram em estado operacional, o procedimento é realizado sem contratempos, deixando um número limitado de clientes fora de serviço e evitando danos maiores a região. Porém, se alguma válvula estiver falha, é necessário elaborar um novo plano de contenção, sendo necessário o isolamento de segmentos adjacentes, deixando mais clientes fora de serviço e por mais tempo, o que pode representar uma perda de faturamento para a empresa operadora do sistema de distribuição de água.

Dependendo da pressão de operação, os danos causados por vazamentos podem ser significativos, e a falha de uma válvula de isolamento pode contribuir para tornar a situação ainda mais crítica, visto que é necessário mais tempo para execução de um novo plano de contenção, contribuindo para maior desperdício de água e aumento dos danos a estrutura, potencialmente levando a erosões e pequenas inundações (exemplo na Figura 8).



Figura 8 – Erosão decorrente de um vazamento de água.

Fonte: <http://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2013/11/vazamento-provoca-erosao-ao-lado-de-avenida-de-taguatinga-no-df.html>, disponível em 25/09/2017.

Eventos de contaminação, que podem ocorrer em decorrência de sabotagem ou da falha de uma tubulação, são ainda mais críticos para serem controlados, com maior impacto no custo e interrupção do abastecimento de água. A falha do sistema de isolamento caracteriza a possibilidade de propagação de substâncias contaminantes, tornando o cenário mais grave. A preocupação com eventos dessa natureza tem aumentado atualmente, colocando em evidência essa nova questão, que deve ser considerada no gerenciamento de sistemas de distribuição de água (GIUSTOLISI & SAVIC, 2010).

Goulter e Coals (1986) propõem uma distribuição de Poisson com parâmetro  $\lambda$  (falhas/km.ano) como a distribuição de probabilidade mais adequada para representar a ocorrência de falhas em tubulações. Com relação aos eventos de contaminação, Alberti *et al.* (2017) assumem que também podem ser bem representados por uma distribuição de Poisson.

Uma válvula de isolamento numa rede de distribuição de água pode, então, ser caracterizada como um sistema de prontidão sujeito a demandas que ocorrem de acordo com um processo homogêneo de Poisson. Dependendo da importância relativa da válvula, eventos de demanda não atendida podem ter efeitos consideravelmente negativos, o que justifica a preocupação com o planejamento da manutenção deste equipamento.

### 3.1.2 Aspectos de falha

Uma válvula de isolamento se encontra em estado de falha quando não é possível fechá-la por completo para bloquear o fluxo de água. Como é comum em equipamentos mecânicos, o estado físico ou “condição” da válvula se deteriora ao longo do tempo, devido a fatores diversos, como fadiga, corrosão, desgaste do material ou acúmulo de detritos. A taxa de deterioração depende da válvula e do seu contexto específico de operação, sendo influenciada por fatores como o tipo de válvula, qualidade da instalação, ambientes externo e interno, regime de operação e manutenção (MARLOW *et al.*, 2012).

As válvulas de isolamento são compostas por um conjunto de componentes, sendo que uns apresentam desgaste mais acelerado que outros. No estudo de caso realizado, verificou-se que o componente mais crítico para válvulas de grandes diâmetros é o parafuso rosca sem fim do mecanismo redutor do sistema de acionamento; sua criticidade se deve ao fato de apresentar desgaste mais rápido e ser altamente afetado por fatores relacionados a qualidade da manutenção.

Na prática, observa-se que antes da ocorrência da falha, o equipamento apresenta um estado defeituoso, caracterizado por dificuldades para girar a haste da válvula e/ou pequenas

fugas de água, e que pode ser identificado através de inspeções. Dessa forma, o processo de deterioração do equipamento pode ser modelado considerando o *delay-time*.

O maior desafio para a modelagem do *delay-time* é a obtenção de dados para estimação das distribuições de probabilidade, considerando que devem ser específicas para cada válvula de isolamento, tendo em vista as influências dos fatores de operação sobre a taxa de deterioração. Algumas alternativas são encontradas na literatura para lidar com tal desafio: Ansell, Archibald & Thomas (2004) apresentam um método que permite estimar a taxa de falha de um equipamento fazendo ajustes de acordo com as covariáveis que influenciam o seu desempenho, o que viabiliza o agrupamento de uma quantidade maior de dados, incorporando dados históricos de outros equipamentos do mesmo modelo. Outro procedimento que pode ser utilizado para agregar mais informações é a elicitación do conhecimento de especialistas (WANG, 1997; MAZZUCHI e VAN DORP, 2012).

### 3.1.3 Manutenção

Devido a criticidade do parafuso sem fim do mecanismo redutor do sistema de acionamento das válvulas de isolamento, o foco principal da análise realizada é a substituição deste componente em especial. Como se trata de um componente com uma taxa de deterioração alta comparado aos demais, e que é altamente afetado pelos aspectos de qualidade da manutenção (especialmente no que concerne a indução de defeito), é válido presumir que uma política de manutenção definida com base em suas características é capaz de atender bem ao conjunto de componentes como um todo. Considera-se, então, que a manutenção preventiva ou corretiva necessariamente envolve a substituição do parafuso sem fim do mecanismo redutor, e outras atividades são realizadas a fim de melhorar o estado do equipamento como um todo, retornando-o a um estado aproximadamente tão bom quanto novo.

Por questões de segurança, não é possível realizar a manutenção da válvula de isolamento em suas condições normais de operação, portanto se faz necessário a interrupção do fluxo de água com o isolamento da região circunvizinha. Trata-se de um caso em que a manutenção do sistema de prontidão incorre na indisponibilidade parcial do sistema principal, e é plausível considerar que, durante tal procedimento, o sistema não está sujeito a ocorrência de demandas.

A qualidade do serviço de manutenção pode influenciar no desempenho da válvula: se o procedimento for realizado de forma incorreta ou utilizando materiais de má qualidade, o equipamento pode vir a falhar precocemente por conta de um componente fraco.

### 3.1.4 Inspeção

A inspeção tem como objetivo apenas identificar o estado do equipamento. Na empresa onde o estudo de caso foi realizado, verificou-se que o procedimento é realizado da seguinte forma: um inspetor tenta fechar a válvula de isolamento e verifica, através dos medidores de pressão à jusante, se o fluxo de água foi interrompido. A inspeção não representa uma indisponibilidade do sistema de prontidão, e o impacto na operação do sistema principal é desprezível.

Alguns aspectos importantes foram observados:

- (1) Os medidores de pressão acusam diferença de pressão quando o fluxo de água é grande o suficiente para preencher a seção transversal da tubulação, o que ocorre quando a válvula está em estado de falha. Pequenas fugas de água não são detectadas, o que dificulta a identificação do estado de defeito.
- (2) A percepção da dificuldade para fechar a válvula (uma característica do estado defeituoso) varia de pessoa para pessoa, dependendo do seu nível de força física. Contudo, é possível perceber, sem erro, quando não é possível fechar uma válvula por completo (estado de falha).
- (3) Uma prática comum é o uso de ferramentas como alavancas para facilitar o fechamento da válvula. Esta prática aumenta o torque aplicado, porém o inspetor pode empregar mais força que o necessário e danificar os componentes do mecanismo de acionamento mecânico da válvula, acelerando o processo de desgaste.

Observando estes aspectos, nota-se que a qualidade da inspeção influencia na acurácia do julgamento sobre o estado da válvula, e também na possibilidade de haver indução de defeito.

Como observado nos itens (1) e (2), é possível considerar que não há erro de julgamento com relação a identificação do estado de falha, porém, a inspeção está sujeita a erro de julgamento com relação a identificação do estado de defeito (falsos positivos e falso negativos). Além disso, como observado no item (3), uma inspeção de má qualidade pode levar a indução de defeito. Com relação a operação das válvulas em ocasiões de contenção de demanda, a probabilidade de indução de defeito é praticamente nula, uma vez que se mobiliza uma equipe mais capacitada para tal operação.

Para fins de ilustração, na Figura 9 são mostrados os detalhes de um redutor C tipo coroa sem fim, componente de uma válvula do tipo borboleta, modelo que normalmente é recomendado para tubulações de grande diâmetro e alta pressão de operação (ZYL, 2014). Na

Figura 10 é exibida a foto de uma rosca sem fim que apresenta desgaste devido ao excesso de força empregado no fechamento da válvula.

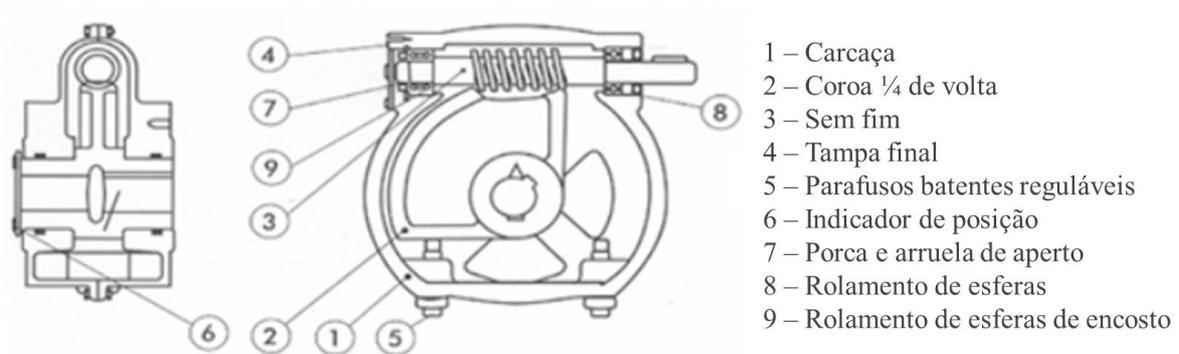


Figura 9 – Detalhamento do redutor de engrenagens de uma válvula borboleta.  
 Fonte: [http://www.pasquetti.com.br/Valvulas\\_Borboleta.html](http://www.pasquetti.com.br/Valvulas_Borboleta.html), disponível em 01/09/2017.



Figura 10 – Parafuso rosca sem fim danificado devido ao excesso de força empregado para fechamento da válvula.

Fonte: esta pesquisa (2017).

Os fatores observados na investigação sobre o sistema em estudo fundamentaram o desenvolvimento do modelo matemático, que pode ser utilizado para definir a frequência mais adequada das ações de manutenção, e também para obter orientações sobre os recursos utilizados, conforme esquematizado na Figura 11. Uma alteração da estrutura clássica do planejamento de manutenção, apresentada no capítulo anterior, é proposta, de forma a

incorporar as informações a respeito dos aspectos de qualidade da manutenção ao processo decisório.

**Quais as características do sistema em estudo?**

- Sistema de prontidão;
- Falha em dois estágios, com defeito possível de ser identificado.



**O que pode ser feito?**

- Inspeções;
- Manutenção preventiva.



**Quando deve ser feito?**

**Quais recursos devem ser utilizados?**

- Aplicação do modelo matemático.



**Quais as tendências que afetam o desempenho do sistema?**

Qualidade da manutenção:

- Qualidade da instalação e dos materiais utilizados na manutenção/substituição de componentes;
- Erros de julgamento na inspeção (falsos positivos e falsos negativos);
- Indução de defeito na inspeção.

*Figura 11 – Estrutura proposta para o planejamento da manutenção.  
Fonte: Esta pesquisa (2017).*

### 3.2 O modelo proposto

Para apoiar o processo de definição da política de manutenção em contextos como o observado no estudo de caso, foi desenvolvido um modelo *delay-time* para um sistema de prontidão sujeito a demandas que ocorrem de acordo com um processo homogêneo de Poisson, que considera os aspectos de qualidade da manutenção citados anteriormente. Para tal, considera-se que o sistema é composto por um suporte e um componente, que juntos desempenham uma função requerida (ASCHER & FEINGOLD, 1984). O componente se deteriora ao longo do tempo e o *status* operacional do sistema depende de seu estado: se o componente estiver em estado bom ou defeituoso, o sistema encontra-se operacional, e se o componente estiver em estado falho, o sistema encontra-se falho. Com a substituição do componente, o sistema como um todo é renovado; por conta disso, na sequência será utilizado o termo substituição em vez de manutenção, para se referir a renovação do sistema.

Os aspectos de qualidade da manutenção, por sua vez, são modelados utilizando a mesma abordagem apresentada em trabalhos anteriores (ALBERTI *et al.*, 2017). Para modelar a qualidade da substituição (que pode estar relacionada a qualidade do serviço de instalação ou a qualidade da fabricação do componente), considera-se que os componentes provêm de uma população heterogênea, formada por itens fracos e itens fortes, com parâmetro de mistura conhecido. Já para modelar a qualidade da inspeção, considera-se que existem probabilidades conhecidas de ocorrer erro de julgamento (falso positivo ou falso negativo), ou indução de defeito na inspeção.

No caso das válvulas de isolamento, o componente pode ser representado pelo parafuso rosca sem fim do mecanismo redutor do sistema de acionamento. É evidente que para renovação do sistema como um todo é necessária a manutenção de outros componentes; porém, tal simplificação é necessária de modo a viabilizar o desenvolvimento do modelo matemático. Mesmo que seja simplificado em alguns aspectos, o modelo continua sendo uma ferramenta muito útil para obter orientações para a definição da política de manutenção mais adequada (AVEN & JENSEN, 1999).

### 3.2.1 Política de manutenção

Conforme indicado no capítulo anterior, políticas de inspeção são adequadas para sistemas de prontidão, e uma alternativa para melhorar a confiabilidade do sistema é adotar uma política mista de inspeção e substituição preventiva. Considerando isso, e também a importância de uma política simples e fácil de ser executada, propõe-se uma política mista “*MT*” semelhante a proposta por Vaurio (1999), que orienta a realização de  $M$  inspeções com um intervalo de tempo  $T$  entre elas. Quando uma inspeção acusa que o componente se encontra em estado de defeito ou falha, é providenciada a sua substituição por uma nova unidade, e por ocasião da  $M$ -ésima inspeção é orientada a sua substituição independentemente de seu estado. Trata-se de um formato de política flexível, que pode assumir a forma de uma política de inspeção pura ( $M = \infty$ ) ou de uma política de substituição preventiva pura ( $M = 1$ ), conforme a configuração que levar ao melhor desempenho no critério de decisão.

### 3.2.2 Notação comum

A notação apresentada na Tabela 4 é utilizada ao longo deste trabalho.

Tabela 4 – Notação utilizada no desenvolvimento do trabalho.

Variáveis de decisão	
$M$	número máximo de inspeções até a substituição preventiva
$T$	intervalo de tempo entre duas inspeções consecutivas
Parâmetros do modelo	
$X$	tempo até a chegada do defeito – variável aleatória não negativa
$H$	<i>delay-time</i> – variável aleatória não negativa
$D$	tempo entre a ocorrência de demandas – variável aleatória não negativa
$f_x(x)$	função densidade de probabilidade de $X$ , resultante de uma mistura das funções densidade de probabilidade de $X$ dos itens fracos ( $f_{x1}(x)$ ) e dos itens fortes ( $f_{x2}(x)$ ): $f_x(x) = p \cdot f_{x1}(x) + (1-p) \cdot f_{x2}(x)$
$F_x(x)$	função da distribuição de probabilidade acumulada de $X$ , resultante de uma mistura: $F_x(x) = P(X < x) = p \cdot F_{x1}(x) + (1-p) \cdot F_{x2}(x)$ $R_x(x) = 1 - F_x(x)$
$f_h(h)$	função densidade de probabilidade de $H$
$F_h(h)$	função da distribuição de probabilidade acumulada de $H$ : $F_h(h) = P(H < h) = 1 - R_h(h)$
$\mu$	taxa de ocorrência de demandas
$f_d(d)$	função densidade de probabilidade de $D$ – assume-se que é uma função exponencial com parâmetro $\mu$ , logo: $f_d(d) = \mu \cdot \exp(-\mu \cdot d)$ $F_d(d) = 1 - \exp(-\mu \cdot d) = 1 - R_d(d)$
$p$	parâmetro de mistura (proporção de itens fracos)
$w$	probabilidade de falso positivo na inspeção
$1-w$	probabilidade de verdadeiro negativo na inspeção
$q$	probabilidade de falso negativo na inspeção
$1-q$	probabilidade de verdadeiro positivo na inspeção
$r$	probabilidade de indução de defeito na inspeção
$c_i$	custo da inspeção
$c_p$	custo da substituição quando o componente se encontra em estado bom <sup>1</sup>
$c_d$	custo da substituição quando o componente se encontra em estado defeituoso <sup>1</sup>
$c_f$	custo da substituição quando o componente se encontra em estado falho <sup>1</sup>

---

$S_i$	tempo necessário para realizar uma inspeção <sup>2</sup> ( $S_i$ incluso em $T$ )
$S_p$	tempo necessário para realizar a substituição do componente, quando este se encontra em estado bom
$S_d$	tempo necessário para realizar a substituição do componente, quando este se encontra em estado defeituoso
$S_f$	tempo necessário para realizar a substituição do componente, quando este se encontra em estado falho
$CUD$	custo decorrente de uma demanda não atendida
$EC$	valor esperado do custo em um ciclo de renovação – custo composto das ações de manutenção e de demandas não atendidas
$EL$	valor esperado do comprimento de um ciclo de renovação
$ES$	valor esperado do tempo das ações da manutenção em um ciclo de renovação
$C_\infty$	custo composto esperado por unidade de tempo no longo prazo
$MTBUD$	tempo médio entre demandas não atendidas
$\rho$	probabilidade de um novo ciclo de renovação terminar em demanda não atendida
$\lambda$	taxa de ocorrência de demandas não atendidas
$P_r$	probabilidade de ocorrência de pelo menos uma demanda não atendida num horizonte de tempo pré-estabelecido

Observações:

<sup>1</sup> Em diversos cenários, é válido considerar na modelagem que o custo da substituição varia de acordo com o estado do componente, de forma a incorporar no modelo o custo da recuperação dos componentes para o estoque da empresa ( $c_f > c_d > c_p$ ).

<sup>2</sup> No contexto do estudo de caso, a execução de uma inspeção tem efeito desprezível sobre a operação do sistema principal, assim é válido considerar  $S_i = 0$ . De todo modo, optou-se por apresentar este parâmetro no modelo, para que o mesmo seja flexível para aplicação em outros contextos.

---

Fonte: Esta pesquisa (2017).

### 3.2.3 Pressupostos do modelo

O modelo apresentado foi desenvolvido a partir dos seguintes pressupostos:

- a. O sistema é renovado com a substituição do componente.
- b. A substituição do componente é realizada quando uma inspeção acusa estado de defeito ou falha, quando ocorre uma demanda não atendida, ou na  $M$ -ésima inspeção, o que ocorrer primeiro.

- c. Em *MT* também é realizada uma inspeção, a fim de verificar o estado do componente e manter as informações registradas.
- d. O componente provém de uma população heterogênea com parâmetro de mistura ( $p$ ) conhecido.
- e. As distribuições de probabilidade de  $X$  (para os itens fracos e fortes) e de  $H$  são conhecidas e estatisticamente independentes.
- f. Em uma inspeção realizada quando o componente está em estado bom, existe uma probabilidade  $w$  conhecida de haver falso positivo, e uma probabilidade  $r$  conhecida de haver indução de defeito.
- g. A indução de defeito pode ocorrer em uma inspeção apenas quando o componente se encontra em estado bom, e em conjunto com um evento de verdadeiro negativo.
- h. Não há possibilidade de indução de defeito quando o sistema é requerido a funcionar por conta de uma demanda.
- i. Em uma inspeção realizada com o componente em estado defeituoso, existe uma probabilidade  $q$  conhecida de haver falso negativo.
- j. Não há erro de julgamento com relação a identificação do estado de falha.
- k. O tempo e o custo das ações de manutenção são constantes e conhecidos.
- l. O componente está sujeito a desgaste natural durante uma ação inspeção.
- m. O tempo dispendido com a inspeção e a substituição do componente não configura como um *downtime*, ou seja, há uma interrupção no processo de chegada de demandas para o sistema.
- n. As demandas ocorrem de acordo com um processo homogêneo de Poisson com taxa conhecida.
- o.  $S_i \ll T$ .

Cabe uma discussão a respeito dos pressupostos do modelo. O pressuposto  $b$  representa uma nova contribuição ao modelo apresentado por Alberti *et al.* (2017), uma vez que considera a possibilidade de programação da substituição em caso de ocorrência de demanda não atendida. Tal pressuposto é possível de ser incorporado ao modelo analítico por conta dos pressupostos  $m$  e  $n$ .

O pressuposto  $m$  é verdadeiro para contextos onde a manutenção e inspeção do sistema de prontidão implica na indisponibilidade do sistema produtivo principal, como é o caso de válvulas de isolamento e freios de emergência. Porém, tal pressuposto não é necessariamente

irrealista em contextos onde, *a priori*, a manutenção do sistema de prontidão representa um *downtime* (como é o caso de sistemas de alarme). Em contextos onde demandas não atendidas têm consequências muito críticas, é pertinente considerar a adoção de soluções alternativas para cumprir o papel do sistema de prontidão enquanto este está sendo mantido ou inspecionado, ou mesmo a interrupção do processo de chegada de demandas, com a parada do sistema produtivo principal (quando isso é possível). Ademais, se a probabilidade de ocorrência de uma demanda não atendida por conta do *downtime* decorrente da inspeção ou manutenção do sistema for consideravelmente baixa, o modelo proposto ainda pode ser uma boa aproximação.

O pressuposto *n*, por sua vez, implica que o tempo entre a ocorrência de demandas é uma variável aleatória não negativa, caracterizada por uma distribuição de probabilidade exponencial, com parâmetro conhecido. A distribuição exponencial apresenta a propriedade de não possuir memória, representada na equação (3.1), o que viabiliza a elaboração do modelo analítico considerando o pressuposto *b* (DOANE & SEWARD, 2014; CAVALCANTE, LOPES & SCARF, 2017).

$$P[D > s + d \mid D > s] = P[D > d] \quad (3.1)$$

### 3.2.4 Desenvolvimento do modelo

O modelo foi desenvolvido a partir da enumeração de todos os cenários que podem ocorrer nas condições apresentadas, conforme detalhamento a seguir. Trata-se de um conjunto de cenários disjuntos e que cobre todo o espaço de eventos possíveis, de modo que a soma das probabilidades de ocorrência destes cenários, independentemente das variáveis de decisão, deve ser igual a 1.

Para cada cenário, é apresentado o cálculo da probabilidade de sua ocorrência e, partindo disso, as expressões para calcular os valores esperados para um ciclo de renovação das seguintes medidas: custo ( $EC_{\text{cenário}}$ ), comprimento do ciclo de renovação ( $EL_{\text{cenário}}$ ) e tempo dispendido com as ações de manutenção ( $ES_{\text{cenário}}$ ). Após o detalhamento de todos os cenários, as expressões são agrupadas de forma a modelar o desempenho da política de manutenção em função das variáveis de decisão.

#### 3.2.4.1 Detalhamento dos cenários

A seguir são apresentados todos os cenários que podem ocorrer nas condições apresentadas (alguns se aplicam apenas para os casos em que  $M > 1$ , conforme indicado).

- *Cenário 1 – substituição após verdadeiro positivo ( $M > 1$ ):* o defeito é detectado na  $i$ -ésima inspeção ( $i < M$ ), antes da ocorrência da falha, o que incorre na substituição preventiva do componente. O defeito pode chegar naturalmente no  $j$ -ésimo intervalo entre inspeções (Figura 12(a)), ou ser induzido na  $j$ -ésima inspeção (Figura 12(b)).

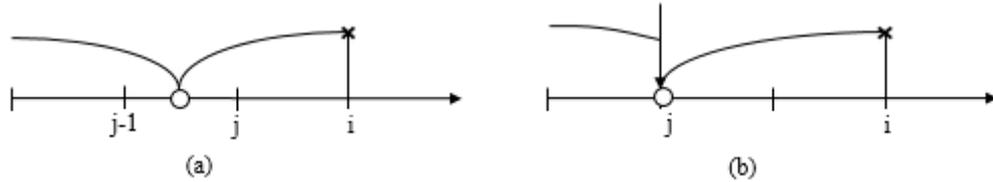


Figura 12 – Cenário 1.  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

- Probabilidades de ocorrência do Cenário 1 (para cada possível  $i$ ):

$$\begin{aligned}
 P_1(T, i) &= (1-q) \cdot \int_0^T f_x(x) \cdot R_h(T-x) dx && \text{se} \\
 & && i = 1 \\
 P_1(T, i) &= \sum_{j=1}^i \left\{ (1-r)^{j-1} \cdot (1-w)^{j-1} \cdot q^{i-j} \cdot (1-q) \cdot \int_{(j-1)T}^{jT} f_x(x) \cdot R_h(iT-x) dx \right\} && \text{se} \\
 &+ \sum_{j=1}^{i-1} \left\{ R_x(jT) \cdot (1-r)^{j-1} \cdot r \cdot (1-w)^j \cdot q^{i-j-1} \cdot (1-q) \cdot R_h((i-j)T) \right\} && i > 1
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

- Custo:

$$EC_1(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} [(i \cdot c_i + c_d) \cdot P_1(T, i)] \tag{3.3}$$

- Comprimento do ciclo de renovação:

$$EL_1(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} [(S_d + iT) \cdot P_1(T, i)] \tag{3.4}$$

- Tempo das ações de manutenção:

$$ES_1(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} [(i \cdot S_i + S_d) \cdot P_1(T, i)] \tag{3.5}$$

- *Cenário 2 – substituição por falha após falso negativo, com falha verificada na ocorrência de demanda ( $M > 1$ ):* o defeito não é detectado nas inspeções e a falha vem a ocorrer, sendo verificada na ocorrência de uma demanda. O defeito pode chegar

naturalmente no  $j$ -ésimo intervalo entre inspeções (Figura 13(a)), ou ser induzido na  $j$ -ésima inspeção (Figura 13(b)).

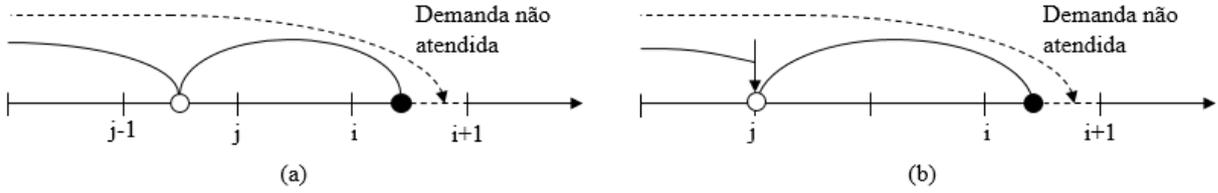


Figura 13 – Cenário 2.  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

➤ Probabilidades de ocorrência do Cenário 2 (para cada possível  $i$ ):

$$P_2(T, i) = q \cdot \int_0^T f_x(x) \cdot \left( \int_{(T-x)}^{(2T-x)} f_h(h) \cdot F_d[2T - (x+h)] dh \right) dx \quad \text{se } i = I$$

$$P_2(T, i) = \left\{ \sum_{j=1}^i \left[ (1-r)^{j-1} \cdot (1-w)^{j-1} \cdot q^{i-j+1} \cdot \int_{(j-1)T}^{jT} f_x(x) \cdot \left( \int_{(iT-x)}^{[(i+1)T-x]} f_h(h) \cdot F_d[(i+1)T - (x+h)] dh \right) dx \right] \right\} \quad (3.6)$$

$$+ \left\{ \sum_{j=1}^{i-1} \left[ R_x(jT) \cdot (1-r)^{j-1} \cdot r \cdot (1-w)^j \cdot q^{i-j} \cdot \int_{[(i-j)T]}^{[(i+1-j)T]} f_h(h) \cdot F_d[(i+1-j)T - h] dh \right] \right\}$$

se  $i > I$

➤ Custo:

$$EC_2(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} \left\{ [(i+1) \cdot c_i + c_f + CUD] \cdot P_2(T, i) \right\} \quad (3.7)$$

➤ Comprimento do ciclo de renovação (para cada possível  $i$ ):

$$ELi_2(T, i) = q \cdot \int_0^T f_x(x) \cdot \left( \int_{(T-x)}^{(2T-x)} f_h(h) \cdot \left( \int_0^{[2T-(x+h)]} f_d(d) \cdot (x+h+d + S_f) dd \right) dh \right) dx \quad (3.8)$$

se  $i = I$

$$\begin{aligned}
ELi_2(T, i) = & \sum_{j=1}^i \left\{ (1-r)^{j-1} \cdot (1-w)^{j-1} \cdot q^{i-j+1} \cdot \int_{(j-1)T}^{jT} f_x(x) \cdot \left( \int_{iT-x}^{[(i+1)T-x]} f_h(h) \cdot \left( \int_0^{[(i+1)T-(x+h)]} f_d(d) \cdot (x+h+d+S_f) dd \right) dh \right) dx \right\} \\
& + \sum_{j=1}^{i-1} \left\{ R_x(jT) \cdot (1-r)^{j-1} \cdot r \cdot (1-w)^j \cdot q^{i-j} \cdot \int_{[(i-j)T]}^{[(i+1-j)T]} f_h(h) \cdot \left( \int_0^{[(i+1-j)T-h]} f_d(d) \cdot (jT+h+d+S_f) dd \right) dh \right\}
\end{aligned}$$

se  $i > 1$

➤ Comprimento do ciclo de renovação:

$$EL_2(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} ELi_2(T, i) \quad (3.9)$$

➤ Tempo das ações de manutenção:

$$ES_2(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} \left\{ [(i+1) \cdot S_i + S_f] \cdot P_2(T, i) \right\} \quad (3.10)$$

- *Cenário 3 – substituição por falha após falso negativo, com falha identificada na inspeção ( $M > 1$ ):* o defeito não é detectado nas inspeções e a falha vem a ocorrer, sendo identificada na inspeção subsequente, antes da ocorrência de uma demanda. O defeito pode chegar naturalmente no  $j$ -ésimo intervalo entre inspeções (Figura 14(a)), ou ser induzido na  $j$ -ésima inspeção (Figura 14(b)).

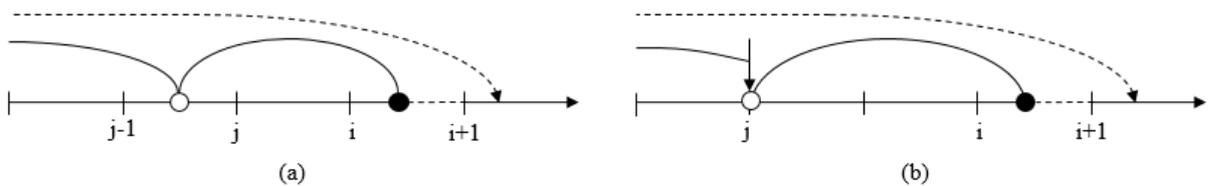


Figura 14 – Cenário 3.  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

➤ Probabilidades de ocorrência do Cenário 3 (para cada possível  $i$ ):

$$P_3(T, i) = q \cdot \int_0^T f_x(x) \cdot \left( \int_{(T-x)}^{(2T-x)} f_h(h) \cdot R_d[2T - (x+h)] dh \right) dx \quad \text{se } i = 1$$

(3.11)

$$P_3(T, i) = \left\{ \sum_{j=1}^i \left[ (1-r)^{j-1} \cdot (1-w)^{j-1} \cdot q^{i-j+1} \cdot \int_{(j-1)T}^{jT} f_x(x) \cdot \left( \int_{(iT-x)}^{[(i+1)T-x]} f_h(h) \cdot R_d[(i+1)T - (x+h)] dh \right) dx \right] \right\} + \left\{ \sum_{j=1}^{i-1} \left[ R_x(jT) \cdot (1-r)^{j-1} \cdot r \cdot (1-w)^j \cdot q^{i-j} \cdot \int_{(i-j)T}^{[(i+1-j)T]} f_h(h) \cdot R_d[(i+1-j)T - h] dh \right] \right\}$$

se  $i > 1$

➤ Custo:

$$EC_3(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} \left\{ [(i+1) \cdot c_i + c_f] \cdot P_3(T, i) \right\} \quad (3.12)$$

➤ Comprimento do ciclo de renovação:

$$EL_3(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} \left\{ [(i+1) \cdot T + S_f] \cdot P_3(T, i) \right\} \quad (3.13)$$

➤ Tempo das ações de manutenção:

$$ES_3(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} \left\{ [(i+1) \cdot S_i + S_f] \cdot P_3(T, i) \right\} \quad (3.14)$$

- *Cenário 4 – substituição por falha após verdadeiro negativo, com falha verificada na ocorrência de demanda ( $M > 1$ ):* o defeito chega em algum momento após a primeira inspeção e a falha ocorre antes da inspeção subsequente, sendo verificada na ocorrência de uma demanda. O defeito pode chegar naturalmente após a  $i$ -ésima inspeção (Figura 15(a)) ou ser induzido na  $i$ -ésima inspeção (Figura 15(b)), e a falha ocorre antes da  $(i+1)$ -ésima inspeção ( $i < M$ ).

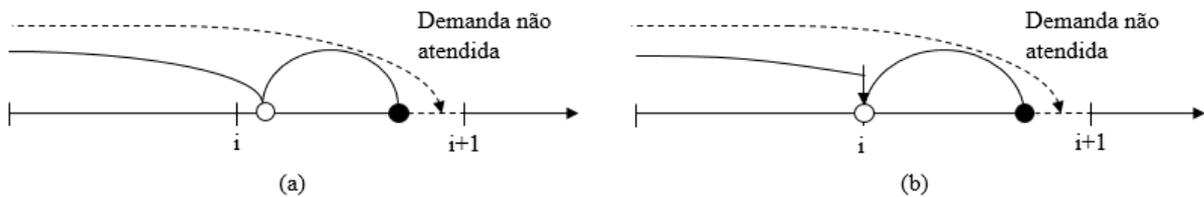


Figura 15 – Cenário 4.  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

- Probabilidades de ocorrência do Cenário 4 (para cada possível  $i$ ):

$$P_4(T, i) = \left\{ (1-r)^i \cdot (1-w)^i \cdot \int_{iT}^{(i+1)T} f_x(x) \cdot \left( \int_0^{[(i+1)T-x]} f_h(h) \cdot F_d[(i+1)T - (x+h)] dh \right) dx \right\} \\ + \left\{ R_x(iT) \cdot (1-r)^{i-1} \cdot r \cdot (1-w)^i \cdot \int_0^T f_h(h) \cdot F_d(T-h) dh \right\} \quad (3.15)$$

- Custo:

$$EC_4(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} \left\{ [(i+1) \cdot c_i + c_f + CUD] \cdot P_4(T, i) \right\} \quad (3.16)$$

- Comprimento do ciclo de renovação (para cada possível  $i$ ):

$$ELi_4(T, i) = \left\{ (1-r)^i \cdot (1-w)^i \cdot \int_{iT}^{(i+1)T} f_x(x) \cdot \left( \int_0^{[(i+1)T-x]} f_h(h) \cdot \left( \int_0^{[(i+1)T-(x+h)]} f_d(d) \cdot (x+h+d+S_f) dd \right) dh \right) dx \right\} \\ + \left\{ R_x(iT) \cdot (1-r)^{i-1} \cdot r \cdot (1-w)^i \cdot \int_0^T f_h(h) \cdot \left( \int_0^{(T-h)} f_d(d) \cdot (iT+h+d+S_f) dd \right) dh \right\} \quad (3.17)$$

- Comprimento do ciclo de renovação:

$$EL_4(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} ELi_4(T, i) \quad (3.18)$$

- Tempo das ações de manutenção:

$$ES_4(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} \left\{ [(i+1) \cdot S_i + S_f] \cdot P_4(T, i) \right\} \quad (3.19)$$

- *Cenário 5 – substituição por falha após verdadeiro negativo, com falha identificada na inspeção ( $M > 1$ ):* o defeito chega em algum momento após a primeira inspeção e a falha ocorre antes da inspeção subsequente, sendo identificada por ocasião da mesma, antes da ocorrência de demanda. O defeito pode chegar naturalmente após a  $i$ -ésima inspeção (Figura 16(a)) ou ser induzido na  $i$ -ésima inspeção (Figura 16(b)), e a falha ocorre antes da  $(i+1)$ -ésima inspeção ( $i < M$ ).

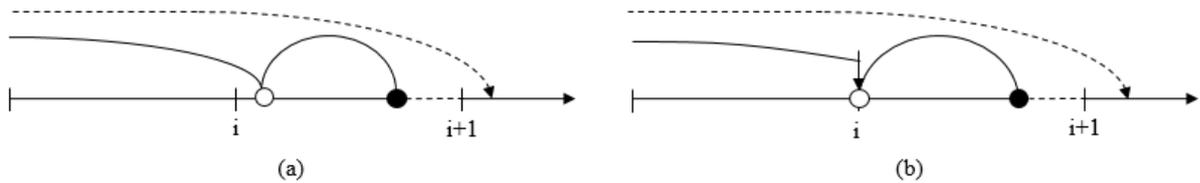


Figura 16 – Cenário 5.  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

- Probabilidades de ocorrência do Cenário 5 (para cada possível  $i$ ):

$$P_5(T, i) = \left\{ (1-r)^i \cdot (1-w)^i \cdot \int_{iT}^{(i+1)T} f_x(x) \cdot \left( \int_0^{[(i+1)T-x]} f_h(h) \cdot R_d[(i+1)T - (x+h)] dh \right) dx \right\} \quad (3.20)$$

$$+ \left\{ R_x(iT) \cdot (1-r)^{i-1} \cdot r \cdot (1-w)^i \cdot \int_0^T f_h(h) \cdot R_d(T-h) dh \right\}$$

- Custo:

$$EC_5(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} \left\{ [(i+1) \cdot c_i + c_f] \cdot P_5(T, i) \right\} \quad (3.21)$$

- Comprimento do ciclo de renovação:

$$EL_5(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} \left\{ [(i+1) \cdot T + S_f] \cdot P_5(T, i) \right\} \quad (3.22)$$

- Tempo das ações de manutenção:

$$ES_5(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} \left\{ [(i+1) \cdot S_i + S_f] \cdot P_5(T, i) \right\} \quad (3.23)$$

- *Cenário 6 – substituição por falha antes da primeira inspeção, com falha verificada na ocorrência de uma demanda ( $M$  qualquer):* a falha ocorre antes da primeira inspeção, devido a um defeito que chegou naturalmente, e é verificada na ocorrência de uma demanda. Como a falha ocorre antes da primeira inspeção, não há possibilidade de haver indução de defeito neste cenário (Figura 17).

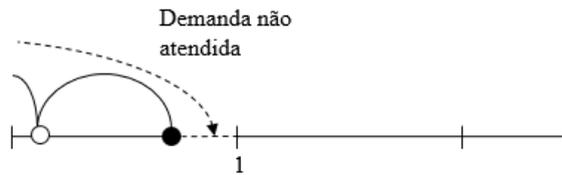


Figura 17 – Cenário 6.  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

- Probabilidade de ocorrência do Cenário 6:

$$P_6(T) = \int_0^T f_x(x) \cdot \left( \int_0^{(T-x)} f_h(h) \cdot F_d[T - (x+h)] dh \right) dx \quad (3.24)$$

- Custo:

$$EC_6(T) = (c_i + c_f + CUD) \cdot P_6(T) \quad (3.25)$$

- Comprimento do ciclo de renovação:

$$EL_6(T) = \int_0^T f_x(x) \cdot \left( \int_0^{(T-x)} f_h(h) \cdot \left( \int_0^{[T-(x+h)]} f_d(d) \cdot (x+h+d+S_f) dd \right) dh \right) dx \quad (3.26)$$

- Tempo das ações de manutenção:

$$ES_6(T) = (S_i + S_f) \cdot P_6(T) \quad (3.27)$$

- *Cenário 7 – substituição por falha antes da primeira inspeção, com falha identificada em inspeção (M qualquer):* a falha ocorre antes da primeira inspeção, devido a um defeito que chegou naturalmente, e é identificada na inspeção subsequente, antes da ocorrência de uma demanda. Como a falha ocorre antes da primeira inspeção, não há possibilidade de haver indução de defeito neste cenário (Figura 18).

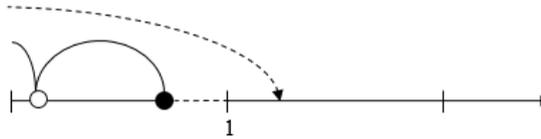


Figura 18 – Cenário 7.  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

- Probabilidade de ocorrência do Cenário 7:

$$P_7(T) = \int_0^T f_x(x) \cdot \left( \int_0^{(T-x)} f_h(h) \cdot R_d[T-(x+h)] dh \right) dx \quad (3.28)$$

- Custo:

$$EC_7(T) = (c_i + c_f) \cdot P_7(T) \quad (3.29)$$

- Comprimento do ciclo de renovação:

$$EL_7(T) = (T + S_f) \cdot P_7(T) \quad (3.30)$$

- Tempo das ações de manutenção:

$$ES_7(T) = (S_i + S_f) \cdot P_7(T) \quad (3.31)$$

- *Cenário 8 – substituição após falso positivo ( $M > 1$ ):* na  $i$ -ésima inspeção ( $i < M$ ) ocorre um evento de falso positivo, consequentemente o componente é substituído por um novo (Figura 19).

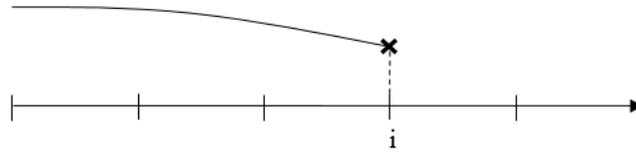


Figura 19 – Cenário 8.  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

- Probabilidades de ocorrência do Cenário 8 (para cada possível  $i$ ):

$$P_8(T, i) = (1 - r)^{i-1} \cdot (1 - w)^{i-1} \cdot w \cdot R_x(i.T) \quad (3.32)$$

- /Custo:

$$EC_8(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} [(i.c_i + c_p) \cdot P_8(T, i)] \quad (3.33)$$

- Comprimento do ciclo de renovação:

$$EL_8(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} [(i.T + S_p) \cdot P_8(T, i)] \quad (3.34)$$

- Tempo das ações de manutenção:

$$ES_8(T, M) = \sum_{i=1}^{M-1} [(i.S_i + S_p) \cdot P_8(T, i)] \quad (3.35)$$

- *Cenário 9 – Substituição em MT com componente em estado defeituoso ( $M$  qualquer):* o componente é substituído apenas na  $M$ -ésima inspeção, ocasião na qual já é programada a substituição preventiva, e se encontra em estado defeituoso. O defeito pode chegar naturalmente no  $j$ -ésimo intervalo entre inspeções (Figura 20(a)), ou ser induzido na  $j$ -ésima inspeção (Figura 20(b)), não ocorre falha e o defeito não é detectado até a  $M$ -ésima inspeção. Se  $M$  for igual a 1, não há a possibilidade de indução de defeito.

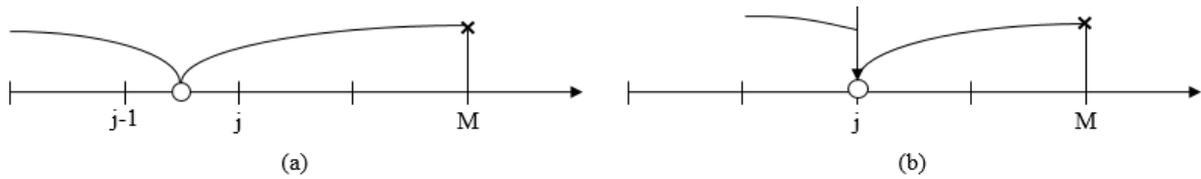


Figura 20 – Cenário 9.  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

- Probabilidade de ocorrência do Cenário 9:

$$P_9(T, M) = \int_0^T f_x(x) \cdot R_h(M.T - x) dx \quad \text{se } M = 1$$

$$P_9(T, M) = \left\{ \sum_{j=1}^M \left[ (1-r)^{j-1} \cdot (1-w)^{j-1} \cdot q^{M-j} \cdot \int_{(j-1).T}^{j.T} f_x(x) \cdot R_h(M.T - x) dx \right] \right\} \quad (3.36)$$

se  $M > 1$

$$+ \left\{ \sum_{j=1}^{M-1} \left[ R_x(j.T) \cdot (1-r)^{j-1} \cdot r \cdot (1-w)^j \cdot q^{M-j-1} \cdot R_h[(M-j).T] \right] \right\}$$

- Custo:

$$EC_9(T, M) = (c_d + M \cdot c_i) \cdot P_9(T, M) \quad (3.37)$$

- Comprimento do ciclo de renovação:

$$EL_9(T, M) = (M.T + S_d) \cdot P_9(T, M) \quad (3.38)$$

- Tempo das ações de manutenção:

$$ES_9(T, M) = (M \cdot S_i + S_d) \cdot P_9(T, M) \quad (3.39)$$

- *Cenário 10 – substituição em MT com componente em estado bom (M qualquer): o componente é substituído em MT, porém se encontra em estado bom (Figura 21).*

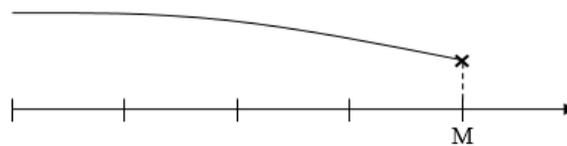


Figura 21 – Cenário 10.  
Fonte: Esta Pesquisa (2017).

- Probabilidade de ocorrência do Cenário 10:

$$P_{10}(T, M) = (1-r)^{M-1} \cdot (1-w)^{M-1} \cdot R_x(M, T) \quad (3.40)$$

- Custo:

$$EC_{10}(T, M) = (c_p + M \cdot c_i) \cdot P_{10}(T, M) \quad (3.41)$$

- Comprimento do ciclo de renovação:

$$EL_{10}(T, M) = (M \cdot T + S_p) \cdot P_{10}(T, M) \quad (3.42)$$

- Tempo das ações de manutenção:

$$ES_{10}(T, M) = (M \cdot S_i + S_p) \cdot P_{10}(T, M) \quad (3.43)$$

### 3.2.4.2 União dos cenários

Com a união dos cenários apresentados é possível obter o valor esperado das medidas de interesse para uma política de manutenção  $MT$  em função das variáveis de decisão, conforme equações abaixo:

- Valor esperado do custo em um ciclo de renovação:

$$\begin{aligned} EC(T, M) &= EC_6(T) + EC_7(T) + EC_9(T, M) + EC_{10}(T, M) && \text{se } M = 1 \\ EC(T, M) &= EC_1(T, M) + EC_2(T, M) + EC_3(T, M) + EC_4(T, M) && \\ &+ EC_5(T, M) + EC_6(T) + EC_7(T) + EC_8(T, M) + EC_9(T, M) + EC_{10}(T, M) && \text{se } M > 1 \end{aligned} \quad (3.44)$$

- Valor esperado do comprimento de um ciclo de renovação:

$$\begin{aligned} EL(T, M) &= EL_6(T) + EL_7(T) + EL_9(T, M) + EL_{10}(T, M) && \text{se } M = 1 \\ EL(T, M) &= EL_1(T, M) + EL_2(T, M) + EL_3(T, M) + EL_4(T, M) && \\ &+ EL_5(T, M) + EL_6(T) + EL_7(T) + EL_8(T, M) + EL_9(T, M) + EL_{10}(T, M) && \text{se } M > 1 \end{aligned} \quad (3.45)$$

- Valor esperado do tempo das ações de manutenção em um ciclo de renovação:

$$\begin{aligned} ES(T, M) &= ES_6(T) + ES_7(T) + ES_9(T, M) + ES_{10}(T, M) && \text{se } M = 1 \\ ES(T, M) &= ES_1(T, M) + ES_2(T, M) + ES_3(T, M) + ES_4(T, M) && \\ &+ ES_5(T, M) + ES_6(T) + ES_7(T) + ES_8(T, M) + ES_9(T, M) + ES_{10}(T, M) && \text{se } M > 1 \end{aligned} \quad (3.46)$$

### 3.2.4.3 Custo esperado por unidade de tempo

O custo esperado por unidade de tempo em longo prazo, referente a composição dos custos das ações de manutenção e de demandas não atendidas, pode ser estimado conforme a equação (3.47):

$$C_{\infty}(T, M) = \frac{EC(T, M)}{EL(T, M)} \quad (3.47)$$

### 3.2.4.4 Risco de ocorrência de demanda não atendida

A probabilidade de que um ciclo de renovação termine na ocorrência de uma demanda não atendida pode ser calculada como a soma das probabilidades de ocorrência dos cenários que consideram essa situação, conforme a equação (3.48).

$$\begin{aligned} \rho(T, M) &= P_6(T) && \text{se } M = 1 \\ \rho(T, M) &= \left[ \sum_{i=1}^{M-1} P_2(T, i) \right] + \left[ \sum_{i=1}^{M-1} P_4(T, i) \right] + P_6(T) && \text{se } M > 1 \end{aligned} \quad (3.48)$$

Os intervalos de tempo dos ciclos de renovação são estatisticamente independentes uns dos outros, então, em concordância com as observações de Scarf *et al.* (2009), é possível afirmar que os intervalos de tempo entre demandas não atendidas são aproximadamente exponencialmente distribuídos com média estimada conforme a equação (3.49).

$$MTBUD(T, M) = \frac{EL(T, M)}{\rho(T, M)} = \frac{1}{\lambda(T, M)} \quad (3.49)$$

Consequentemente, partindo da mesma suposição, é possível estimar de forma aproximada a probabilidade de ocorrência de pelo menos uma demanda não atendida num horizonte de tempo  $N$  (com a mesma unidade de medida de MTBUD), conforme a equação (3.50).

$$\Pr(T, M, N) = 1 - \exp[-\lambda(T, M).N] \quad (3.50)$$

Como a distribuição exponencial possui a propriedade de não ter memória, uma vez que a política de manutenção seja adotada e taxa de ocorrência de demandas permaneça aproximadamente constante, a probabilidade de ocorrência de uma demanda não atendida num horizonte de tempo  $N$  independe do instante de referência considerado. Tal probabilidade

fornece uma boa noção da vulnerabilidade do sistema, e pode ser interpretada como uma medida de risco.

### 3.2.5 Adaptando o modelo para outros contextos

O modelo apresentado também pode ser aplicado a sistemas de prontidão em contextos mais simples, apenas definindo valores específicos para as variáveis de entrada, conforme indicado na Tabela 5.

Além disso, ao definir  $w = 0$  e  $q = 1$ , modela-se uma política na qual o componente é substituído apenas quando se identifica o estado de falha, uma vez que não há erro de julgamento com relação a identificação desta condição. Já para o caso de um sistema com apenas dois estados possíveis (operacional e falho) e sujeito a inspeção perfeita, basta definir  $w = q = r = 0$  e alternar os cenários 4, 5, 6, 7 e 10, estabelecendo  $F_h(h) = 1 \forall h$  (os demais cenários não se aplicam).

*Tabela 5 – Aplicação do modelo em contextos mais simples.*

<b>Contexto</b>	<b>Parâmetros de entrada</b>
Componentes provêm de uma população homogênea	$p = 0$
Inspeção sem erros de julgamento	$w = q = 0$
Inspeção sem indução de defeito	$r = 0$
Inspeção perfeita	$w = q = r = 0$

*Fonte: Esta pesquisa (2017).*

Observa-se ainda que o modelo não apresenta restrições quanto as distribuições de probabilidade de  $X$  e  $H$ .

### 3.3 Aplicação numérica

Nesta seção é apresentada uma aplicação numérica do modelo, a fim de observar algumas tendências, especialmente no que concerne ao impacto dos parâmetros de qualidade na definição da política de manutenção, no custo esperado e no risco resultantes. Os resultados são apresentados em duas partes distintas: na primeira parte, o critério de otimização considerado para definição da política de manutenção é o custo esperado por unidade de tempo em longo prazo ( $C_\infty$ ); e na segunda parte é considerado o risco de ocorrência de pelo menos uma demanda não atendida em um horizonte de cinco anos ( $Pr$ ).

### 3.3.1 Especificação dos valores dos parâmetros do modelo (caso base)

Para aplicação do modelo, considerou-se uma válvula de isolamento de uma rede de distribuição de água instalada em uma tubulação que opera em alta pressão, em um local de fácil acesso, e os segmentos adjacentes cobrem uma região sujeita a risco de contaminação da água. Os parâmetros utilizados nesta aplicação foram estimados com base na experiência da equipe que trabalha na empresa onde o estudo de caso foi realizado.

Conforme explicado anteriormente, o modelo considera um sistema composto por um componente e um suporte, que juntos desempenham uma função operacional, e o *status* operacional do sistema depende do estado do componente. No caso das válvulas de isolamento, o componente pode ser representado pelo parafuso sem fim do mecanismo redutor do sistema de acionamento, portanto, os valores dos parâmetros indicados a seguir são característicos desse componente em especial.

Falhas precoces são observadas em aproximadamente 10% dos componentes, decorrentes de má instalação ou de itens que retornaram ao estoque da empresa após uma recuperação mal feita; portanto, foi estabelecido  $p = 0,1$ . Distribuições Weibull foram utilizadas para caracterizar as distribuições de  $X$  e  $H$ , com os parâmetros indicados na Tabela 6.

*Tabela 6 – Parâmetros das distribuições de probabilidade de  $X$  e  $H$  (Weibull).*

<b>Variável</b>	<b>Parâmetro de escala</b>	<b>Parâmetro de forma</b>
$X$ – componentes fracos	$\eta_1 = 1$ ano	$\beta_1 = 2$
$X$ – componentes fortes	$\eta_2 = 4$ anos	$\beta_2 = 3$
$H$	$\eta_3 = 0,25$ ano	$\beta_3 = 1$

*Fonte: Esta pesquisa (2017).*

No cenário inicial observado no estudo de caso, verificou-se uma baixa probabilidade de ocorrência de falso positivo na inspeção, acompanhada de uma alta probabilidade de ocorrência de falso negativo, enquanto a probabilidade de haver indução de defeito era baixa, mas não insignificante. Dessa forma, foram estimados os seguintes valores para as variáveis que caracterizam a qualidade da inspeção:  $w = 0,05$ ,  $q = 0,3$  e  $r = 0,05$ .

Uma válvula de isolamento está sujeita a demandas provenientes dos diferentes segmentos adjacentes a mesma: quando há necessidade de isolamento de um segmento, o segmento adjacente também pode ser afetado dependendo do estado da válvula. Cada segmento

possui uma taxa específica de ocorrência de demandas, e as consequências associadas também podem ser diferentes em cada caso. Para uma aplicação direta do modelo apresentado, o cenário foi simplificado de forma a considerar a válvula como um sistema de prontidão sujeito a demandas de uma única fonte cujas consequências, a depender de seu estado operacional, são aproximadamente constantes e conhecidas. Considerou-se, então, que a taxa média de ocorrência de demandas é  $\mu = 3$  demandas/ano.

Para a manutenção da válvula, é necessário interromper o abastecimento de água na região adjacente, o que representa uma indisponibilidade parcial do sistema principal. Para realizar este procedimento são necessárias aproximadamente 3 horas quando a válvula se encontra em estado bom ( $S_p = 3$  h), 6 horas quando se encontra em estado defeituoso ( $S_d = 6$  h) e 12 horas quando se encontra em estado falho ( $S_f = 12$  h). As ações de inspeção, por sua vez, têm um impacto desprezível no abastecimento, então é pertinente considerar  $S_i = 0$ . Além disso, devido limitações organizacionais, acrescenta-se as seguintes restrições ao problema:  $T \geq 1$  mês,  $M.T \geq 6$  meses.

Os custos requeridos para o modelo foram estabelecidos tomando como referência o custo da substituição preventiva do componente, de forma que  $c_p = 1$  un. (quantidade não especificada em unidades monetárias). Os demais custos foram então especificados da seguinte forma:  $c_i = 0,04$  un., o custo da inspeção é significativamente menor que o da substituição preventiva, porém não chega a ser insignificante por conta do custo do deslocamento até o local da válvula. Com relação aos custos da substituição:  $c_d = 1,5$  un. e  $c_f = 3$  un.; é plausível considerar que estes são diferentes, pois é levado em consideração o custo de recuperação do componente para retornar ao estoque da empresa, que varia de acordo com o seu estado ( $c_f > c_d > c_p$ ). Por fim, o custo decorrente de uma demanda não atendida é  $CUD = 25$  un.

### 3.3.2 Parte 1 – Otimização do custo

Na primeira parte da aplicação, busca-se avaliar o impacto dos diferentes aspectos de qualidade abordados na definição e no desempenho de uma política de manutenção ótima, com base no critério custo. O custo ótimo para um determinado caso é denotado por  $C_\infty^*$ .

Uma abordagem prática para identificar a política ótima é encontrar o valor ótimo de  $T$  para diferentes valores fixados de  $M$ , para então definir o valor ótimo de  $M$  (VAURIO, 1999). Na Figura 22 é apresentado um gráfico de  $C_\infty$  em função de  $T$ , para diferentes valores de  $M$ , aplicados sobre o caso base. O valor de  $C_\infty$  converge para 7,212 un. com o aumento de  $T$ , o que significa que, caso se opte por uma política segundo a qual a substituição do componente só é

realizada em caso de ocorrência de demanda não atendida, o custo esperado por unidade de tempo em longo prazo é 7,212 un.

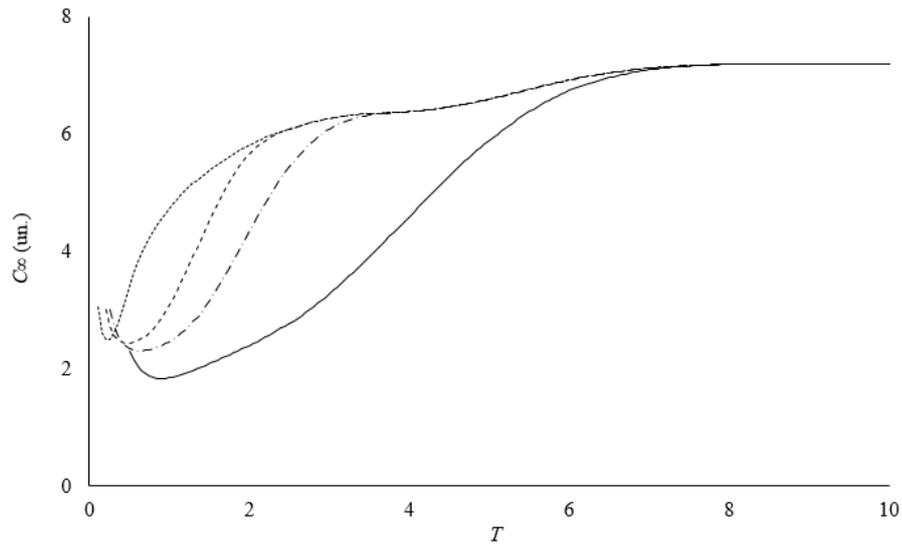


Figura 22 –  $C_{\infty}$  (un.) em função de  $T$ , para  $M = 1$  (—),  $M = 2$  (- -),  $M = 3$  (---),  $M = 10$  (...).  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

Os resultados são apresentados em três etapas: primeiro, é realizada uma análise de sensibilidade do modelo aos parâmetros que caracterizam a qualidade da manutenção, de forma a evidenciar a importância de uma investigação minuciosa sobre as tendências que afetam o sistema. Depois, explora-se a relação entre custo e qualidade da manutenção, de forma a mostrar que, em alguns casos, uma manutenção com maior custo, porém com maior qualidade, pode ser mais econômica em longo prazo. Por fim, algumas observações adicionais são apresentadas.

### 3.3.2.1 Avaliando os efeitos dos diferentes aspectos de qualidade da manutenção

Os resultados discutidos nesta subseção são apresentados na Tabela 7. O caso base é apresentado na primeira linha, e nas demais linhas os parâmetros de qualidade que foram alterados com relação ao caso base são destacados em negrito (os demais dados de entrada do modelo não foram alterados). Para cada caso, é apresentada a política  $MT$  ótima, e também as políticas ótimas de substituição preventiva pura (SPP) e de inspeção pura (IP), para as devidas comparações. O critério de otimização considerado foi o custo ( $C_{\infty}$ ), e a probabilidade de ocorrência de uma demanda não atendida em um horizonte de cinco anos ( $Pr$ ) também é apresentada, mas este indicador é uma consequência, interferindo na definição da política ótima apenas quando há empate com relação ao critério principal.

No caso base, uma política SPP ( $M=I$ ) mostrou-se mais competitiva que políticas que envolvam a realização de inspeções. Esse resultado é consequência dos indicadores de qualidade da inspeção, que tornam essa prática desvantajosa. Para uma política SPP, a definição de  $T$  e o custo esperado resultante são fortemente influenciados pelo parâmetro de mistura da população de componentes e, evidentemente, não há qualquer influência dos parâmetros de qualidade da inspeção.

Para os casos apresentados, é possível observar que, se o desempenho econômico da política IP for melhor que o desempenho da política SPP, então certamente há uma política intermediária (mista) que seja mais competitiva que ambas. Isso ocorre porque no primeiro caso o desempenho da política é fortemente influenciado pela qualidade da inspeção, evidenciando assim a vantagem (ou desvantagem) dessa prática. Desse modo, a diferença entre o desempenho das políticas IP e SSP é um ponto importante a ser observado.

Com relação ao parâmetro de mistura ( $p$ ), nas linhas 1 a 4 é possível verificar que, quanto menor a proporção de itens fracos, mais competitiva é a política SPP comparada a política IP. Este resultado era esperado, visto que nessas condições a política SPP tende a ser mais eficaz. Além disso, observa-se que o custo esperado para a política SPP tende a variar de forma mais sensível com a variação de  $p$ , se comparado a política IP.

Variando o valor de  $r$  sobre o caso base, verifica-se que para  $r \geq 0,03$  a política SPP é a melhor alternativa; o que evidencia que, mesmo que a probabilidade de indução de defeito seja baixa, não pode ser considerada desprezível. Isso se torna ainda mais evidente quando ocorre efeito combinado da indução de defeito e de falsos negativos na inspeção: o defeito pode ser induzido precocemente, e não detectado nas inspeções subsequentes, aumentando a probabilidade de ocorrência de falha e, conseqüentemente, aumentando o *downtime* esperado. Este efeito pode ser observado nas linhas 6 e 17.

Também é possível observar, nas linhas 1 e 5 a 8, que o modelo é especialmente sensível ao valor de  $r$ : uma pequena variação no valor de  $r$  leva a uma variação significativa no custo esperado para a política IP ótima. Isso demonstra que este aspecto de qualidade tem o maior impacto na definição e desempenho da política de manutenção, e evidencia a importância de uma análise de sensibilidade pois, dependendo do nível de incerteza com relação ao valor de  $r$ , pode ser recomendável optar por uma política mais conservadora (neste caso, uma política SPP).

Tabela 7 – Análise da sensibilidade do modelo aos parâmetros que caracterizam a qualidade da manutenção (critério de referência: custo).

Caso	Parâmetros de qualidade				Política MT ótima					Política SPP ótima (M=1)			Política IP ótima (M=∞)		
	<i>p</i>	<i>w</i>	<i>q</i>	<i>r</i>	<i>M</i>	<i>T</i> (anos)	<i>M.T</i> (anos)	<i>C<sub>∞</sub>*</i> (un.)	<i>Pr</i>	<i>T</i> (anos)	<i>C<sub>∞</sub>*</i> (un.)	<i>Pr</i>	<i>T</i> (anos)	<i>C<sub>∞</sub>*</i> (un.)	<i>Pr</i>
1 Caso base	0,10	0,05	0,30	0,05	1	0,901	0,901	1,834	0,107	0,901	1,834	0,107	0,154	2,547	0,190
2 <i>p</i> maior	<b>0,15</b>	0,05	0,30	0,05	1	0,771	0,771	2,100	0,115	0,771	2,100	0,115	0,152	2,615	0,193
3 <i>p</i> menor	<b>0,05</b>	0,05	0,30	0,05	1	1,126	1,126	1,482	0,091	1,126	1,482	0,091	0,157	2,482	0,188
4 <i>p</i> nulo	<b>0</b>	0,05	0,30	0,05	1	1,364	1,364	1,029	0,044	1,364	1,029	0,044	0,159	2,419	0,185
5 <i>r</i> maior	0,10	0,05	0,30	<b>0,10</b>	1	0,901	0,901	1,834	0,107	0,901	1,834	0,107	0,171	3,785	0,317
6 <i>r</i> menor	0,10	0,05	0,30	<b>0,03</b>	1	0,901	0,901	1,834	0,107	0,901	1,834	0,107	0,146	2,029	0,132
7 <i>r</i> menor	0,10	0,05	0,30	<b>0,01</b>	15	0,178	2,670	1,441	0,078	0,901	1,834	0,107	0,137	1,498	0,071
8 <i>r</i> nulo	0,10	0,05	0,30	<b>0</b>	15	0,177	2,655	1,172	0,045	0,901	1,834	0,107	0,133	1,227	0,039
9 <i>w</i> maior	0,10	<b>0,10</b>	0,30	0,05	1	0,901	0,901	1,834	0,107	0,901	1,834	0,107	0,194	2,630	0,208
10 <i>w</i> menor	0,10	<b>0,01</b>	0,30	0,05	1	0,901	0,901	1,834	0,107	0,901	1,834	0,107	0,128	2,445	0,173
11 <i>w</i> nulo	0,10	<b>0</b>	0,30	0,05	1	0,901	0,901	1,834	0,107	0,901	1,834	0,107	0,122	2,416	0,169
12 <i>q</i> maior	0,10	0,05	<b>0,50</b>	0,05	1	0,901	0,901	1,834	0,107	0,901	1,834	0,107	0,148	2,775	0,214
13 <i>q</i> menor	0,10	0,05	<b>0,10</b>	0,05	1	0,901	0,901	1,834	0,107	0,901	1,834	0,107	0,163	2,363	0,173
14 <i>q</i> nulo	0,10	0,05	<b>0</b>	0,05	1	0,901	0,901	1,834	0,107	0,901	1,834	0,107	0,168	2,282	0,166
15 <i>w</i> e <i>q</i> menores	0,10	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	0,05	1	0,901	0,901	1,834	0,107	0,901	1,834	0,107	0,135	2,263	0,157
16 <i>w</i> e <i>q</i> nulos	0,10	<b>0</b>	<b>0</b>	0,05	1	0,901	0,901	1,834	0,107	0,901	1,834	0,107	0,133	2,156	0,146
17 inspeção melhor	0,10	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>	20	0,149	2,980	1,745	0,113	0,901	1,834	0,107	0,128	1,768	0,105
18 inspeção perfeita	0,10	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	20	0,147	2,940	0,935	0,025	0,901	1,834	0,107	0,118	0,953	0,022
19 manutenção perfeita	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	15	0,174	2,610	0,832	0,021	1,364	1,029	0,044	0,118	0,888	0,018
20 política 2 estados	0,10	<b>0</b>	<b>1</b>	0,05	1	0,901	0,901	1,834	0,107	0,901	1,834	0,107	0,124	3,761	0,329
21 política 2 estados	0,10	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0,01</b>	10	0,182	1,820	1,810	0,137	0,901	1,834	0,107	0,092	1,982	0,125

Fonte: Esta pesquisa (2017).

Nas linhas 1 e 9 a 11, verifica-se que a variação de  $w$  (probabilidade de falso positivo) não surtiu efeito na definição da política *MT* ótima. Já no que concerne a política *IP* ótima, observa-se que, quanto maior  $w$ , maior deve ser o intervalo entre inspeções, no sentido de mitigar os efeitos de possíveis substituições precoces. Por outro lado, nas linhas 1 e 12 a 14 observa-se uma tendência contrária no que diz respeito a probabilidade de falso negativo: quanto maior  $q$ , menor deve ser o intervalo entre inspeções recomendado, no sentido de aumentar as chances de detecção de defeitos antes da ocorrência de falha. Essas observações vão ao encontro das tendências observadas por Berrade *et al.* (2012) e Alberti *et al.* (2017) em seus estudos de caso.

Os parâmetros de acurácia do julgamento na inspeção não exercem um impacto tão significativo nos resultados se comparado ao efeito da indução de defeito. Seu impacto é mais significativo quando se combina com outros aspectos de qualidade: o efeito combinado da indução de defeito com os falsos negativos contribui para aumentar *downtime* esperado do sistema de prontidão, enquanto o efeito combinado da população heterogênea com os falsos positivos contribui para diminuir a confiabilidade do sistema (BERRADE *et al.*, 2015; ALBERTI *et al.*, 2017).

Nas linhas 18 e 19 são apresentados os resultados obtidos para os casos de inspeção perfeita e manutenção perfeita, respectivamente. Em ambos, a política *MT* ótima considera a realização de inspeções, sendo que no primeiro caso o intervalo entre inspeções é menor, de forma a mitigar os efeitos da população heterogênea. O custo esperado resultante da política ótima nestes casos é significativamente inferior se comparado ao resultado do caso base, o que demonstra o impacto da qualidade da manutenção e a importância deste modelo para evitar equívocos.

Por fim, nas linhas 20 e 21, considera-se uma política segundo a qual a substituição do componente é realizada somente quando é identificado o estado de falha. Nessas condições, para a política *IP*, os resultados são afetados de forma significativa, mesmo quando comparados a casos com alta probabilidade de erros de julgamento (linha 20 comparada às linhas 1, 9 e 12), e o modelo fica ainda mais sensível a variação de  $r$ . Para  $r = 0,01$ , a política *MT* ótima indica a realização da substituição preventiva num intervalo de tempo menor, de forma a mitigar os efeitos do *downtime*; entretanto, o custo resultante ainda é superior quando comparado ao obtido com a política que considera a substituição em caso de identificação de defeito (linha 7).

Nota-se que, quando a política *MT* ótima indica a realização de inspeções, a substituição preventiva do componente é programada para uma idade significativamente maior que a definida para uma política *SPP*, o que permite melhor aproveitamento da vida útil dos componentes, principalmente os fortes. No caso base, por exemplo, a substituição preventiva é programada para 0,901 ano, o que representa apenas 22,5% de  $\eta_2$ . Esse fator ajuda a explicar o grande impacto da melhoria dos indicadores de qualidade da inspeção na melhoria do desempenho da política de manutenção.

### 3.3.2.2 Investindo em manutenção de maior qualidade

A qualidade da manutenção pode ser melhorada de diversas formas: treinamento da equipe ou substituição por outra equipe mais capacitada, utilização de novas tecnologias de apoio, entre outros exemplos. Em geral, melhorar a qualidade significa investimento, e nesta subseção o modelo é utilizado para analisar as vantagens que podem ser obtidas com isso.

Os resultados discutidos nesta subseção são apresentados na Tabela 8. O caso base, que representa o cenário inicial, é apresentado na linha superior da tabela, e nas demais linhas são apresentados casos onde algum aspecto de qualidade é melhorado, com o aumento de algum dos custos da manutenção. Os parâmetros de qualidade e os custos alterados com relação ao caso base são destacados em negrito. De forma a representar melhor a realidade, considerou-se que, após o investimento, o nível de incidência de erros na manutenção diminui para patamares baixos, porém não nulos. Quando o custo esperado obtido no novo cenário é inferior ao custo esperado do cenário inicial, o resultado é destacado em negrito.

Inicialmente, na linha 2, verifica-se que, para um aumento de 100% no custo da inspeção, a melhoria na acurácia do julgamento, quando não acompanhada de uma redução no nível de indução de defeitos, não vale a pena do ponto de vista econômico. Já o investimento na redução da indução de defeitos tem um impacto bastante positivo no desempenho econômico da política de manutenção, mesmo com um aumento de 100% no custo da inspeção (linha 3). Em compensação, se estes dois investimentos forem realizados em conjunto, obtém-se o melhor resultado entre os cenários apresentados na Tabela 8. Isso se deve ao impacto do efeito combinado dos aspectos de qualidade da inspeção, explanado anteriormente.

Nas linhas 5 a 8 considerou-se que a proporção de itens fracos na população de componentes é reduzida pela metade com o investimento na manutenção, representado por um aumento de 20% dos custos de substituição. Em todos os casos tal investimento mostrou-se vantajoso do ponto de vista econômico, e os resultados foram melhorados quando em conjunto

com o investimento na melhoria da inspeção (desde que incluída a redução na indução de defeitos). Porém, dentre os cenários explorados, o mais vantajoso é o investimento voltado apenas para a qualidade da inspeção; isso se verifica porque o custo deste tipo de ação é consideravelmente inferior ao custo da substituição, mas o impacto de sua qualidade no desempenho da política de manutenção é bastante significativo.

### 3.3.2.3 Observações adicionais

No que diz respeito a relação entre as variáveis de decisão, nota-se que quanto maior o valor fixado para  $M$ , menor o intervalo de tempo entre inspeções ( $T$ ) adequado, e este valor converge até o indicado para a política IP (Figura 23). O valor de  $M$  ótimo, por sua vez, é fortemente influenciado pelos aspectos de qualidade da manutenção (Figura 24).

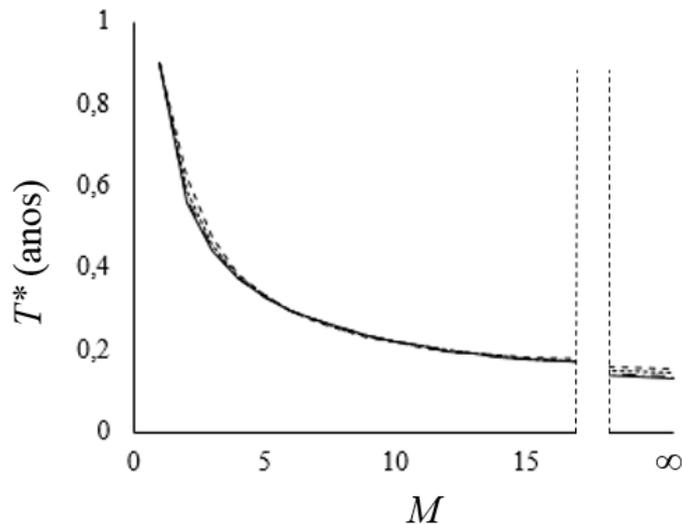


Figura 23 –  $T^*$  em função de  $M$  e  $r$  (variando sobre o caso base), para  $r = 0$  (—),  $r = 0,01$  (- . -),  $r = 0,03$ (---),  $r = 0,05$  (- - -).  
 Fonte: Esta pesquisa (2017).

Tabela 8 – Exploração da relação entre custo e qualidade da manutenção.

Caso	Parâmetros de qualidade				Custos				Política ótima				
	<i>p</i>	<i>w</i>	<i>q</i>	<i>r</i>	<i>c<sub>i</sub></i> (un.)	<i>c<sub>p</sub></i> (un.)	<i>c<sub>d</sub></i> (un.)	<i>c<sub>f</sub></i> (un.)	<i>M</i>	<i>T</i> (anos)	<i>M.T</i> (anos)	<i>C<sub>∞</sub>*</i> (un.)	<i>Pr</i>
1 Caso base	0,10	0,05	0,30	0,05	0,04	1,00	1,50	3,00	1	0,901	0,901	1,834	0,107
2 Melhorando o julgamento	0,10	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	0,05	<b>0,08</b>	1,00	1,50	3,00	1	0,917	0,917	1,878	0,111
3 Reduzindo indução de defeito	0,10	0,05	0,30	<b>0,01</b>	<b>0,08</b>	1,00	1,50	3,00	10	0,236	2,360	<b>1,631</b>	0,097
4 Melhoria da inspeção	0,10	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	<b>0,01</b>	<b>0,12</b>	1,00	1,50	3,00	9	0,262	2,358	<b>1,629</b>	0,093
5 Melhoria da substituição	<b>0,05</b>	0,05	0,30	0,05	0,04	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,60</b>	1	1,212	1,212	<b>1,670</b>	0,103
6 Melhoria conjunta	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	0,05	<b>0,08</b>	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,60</b>	1	1,231	1,231	<b>1,703</b>	0,105
7 Melhoria conjunta	<b>0,05</b>	0,05	0,30	<b>0,01</b>	<b>0,08</b>	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,60</b>	7	0,302	2,114	<b>1,649</b>	0,096
8 Melhoria conjunta	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	<b>0,01</b>	<b>0,12</b>	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,60</b>	6	0,345	2,070	<b>1,648</b>	0,094

Fonte: Esta pesquisa (2017).

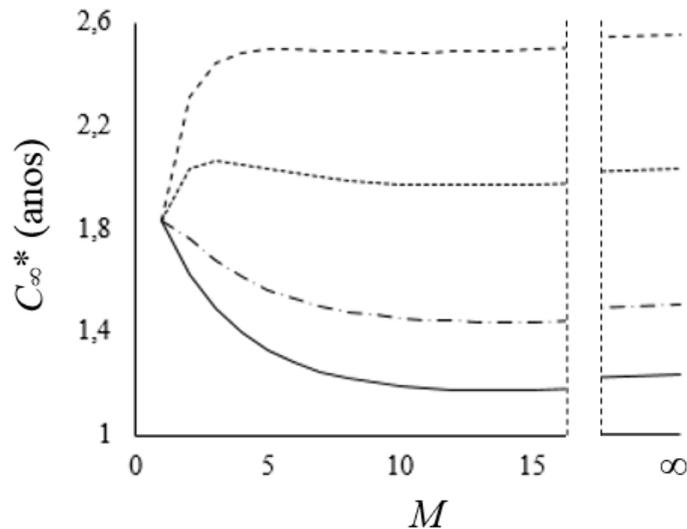


Figura 24 –  $C_{\infty}^*$  em função de  $M$  e  $r$  (variando sobre o caso base), para  $r = 0$  (—),  $r = 0,01$  (— · —),  $r = 0,03$  (---),  $r = 0,05$  (- - -).  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

Já com relação aos eventos de demandas, espera-se que quanto maiores os valores de  $\mu$  e  $CUD$ , mais conservadoras tendem a ser as políticas de manutenção recomendadas, a fim de compensar o maior risco associado a demandas não atendidas. Alguns resultados são apresentados na Tabela 9, confirmando essa expectativa.

Tabela 9 – Relação entre  $\mu$ ,  $CUD$  e a política de manutenção ótima.

Caso	$\mu$ $CUD$		Política $MT$ ótima				Política $IP$ ótima ( $M=\infty$ )			
			$M$	$T$ (anos)	$C_{\infty}^*$ (un.)	$Pr$	$T$ (anos)	$C_{\infty}^*$ (un.)	$Pr$	
1	Caso base	3	25	1	0,901	1,834	0,107	0,154	2,547	0,190
2	$CUD$ menor	3	<b>20</b>	1	0,996	1,710	0,127	0,172	2,327	0,207
3	$CUD$ maior	3	<b>30</b>	1	0,836	1,940	0,094	0,142	2,750	0,178
4	$\mu$ menor	<b>2</b>	25	1	0,975	1,697	0,097	0,178	2,212	0,155
5	$\mu$ maior	<b>4</b>	25	1	0,862	1,927	0,115	0,141	2,826	0,220

Fonte: Esta pesquisa (2017).

Por fim, uma questão crucial é que, se houver a possibilidade de haver erro de julgamento com relação ao estado de falha, o desempenho de uma política  $IP$  pode ser seriamente afetado, pois o *downtime* em um ciclo de renovação pode não se limitar apenas ao intervalo entre inspeções. Neste contexto, políticas que contemplam a realização de substituição preventiva tendem a ganhar mais importância, e a diferença entre os resultados obtidos pelas políticas  $MT$

e IP ótimas pode ser significativa, de forma que uma análise diferente da que foi realizada neste trabalho pode ser necessária.

### 3.3.3 Parte 2 – Otimização do risco

Na segunda parte da aplicação, busca-se avaliar o impacto dos diferentes aspectos de qualidade abordados na definição e no desempenho de uma política de manutenção ótima, com base no critério risco. O risco aqui é considerado como a probabilidade de ocorrência de pelo menos uma demanda não atendida num horizonte de cinco anos ( $Pr$ ). Tal medida foi utilizada pois permite que um possível decisor identifique com mais facilidade as diferenças entre as distribuições de probabilidade do tempo entre demandas não atendidas. O risco ótimo para um determinado caso é denotado por  $Pr^*$ .

Diferentemente do processo de otimização do custo, que busca um ponto de equilíbrio entre o custo esperado das ações de manutenção (que tende a ser maior quanto mais frequentes forem estas ações) e o custo esperado decorrente de demandas não atendidas (que tende a ser maior quanto menos frequente for a manutenção), a otimização do risco depende basicamente das restrições operacionais do problema: quanto maior o valor de  $T$  (e  $M.T$ ), maior a probabilidade de ocorrer uma demanda não atendida, logo, o risco será menor quanto mais frequentes puderem ser as ações de manutenção.

Na Figura 25 é apresentado um gráfico de  $Pr$  em função de  $T$ , para diferentes valores de  $M$ , aplicados sobre o caso base. Para grandes valores de  $T$ , o valor de  $Pr$  converge para 0,724, o que significa que, caso se opte por uma política segundo a qual a substituição do componente só é realizada em caso de ocorrência de demanda não atendida, a probabilidade de ocorrer pelo menos uma demanda não atendida num horizonte de cinco anos é 0,724.

Os resultados discutidos nesta subseção são apresentados na Tabela 10. O caso base é apresentado na primeira linha, e nas demais linhas os parâmetros de qualidade que foram alterados com relação ao caso base são destacados em negrito (os demais dados de entrada do modelo não foram alterados).

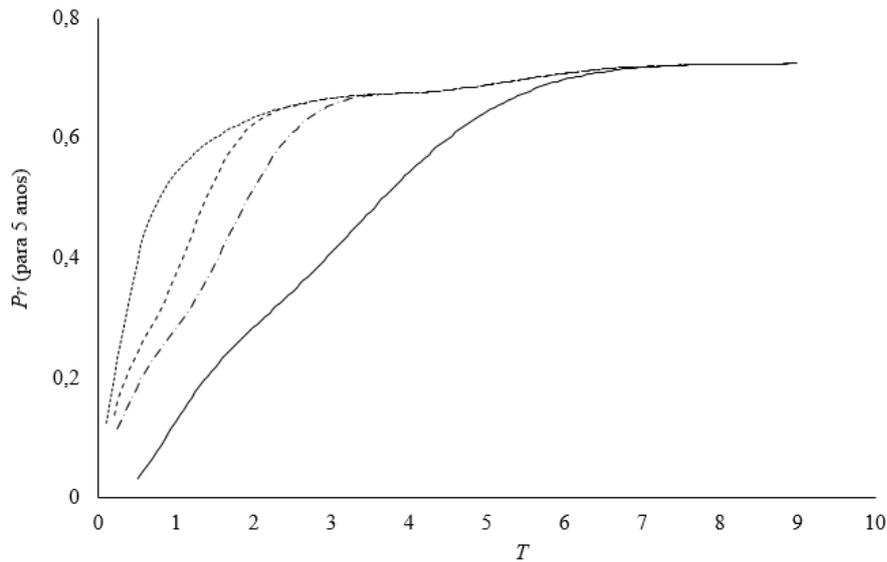


Figura 25 –  $Pr$  (para 5 anos) em função de  $T$ , para  $M = 1$  (—),  $M = 2$  (- -),  $M = 3$  (---),  $M = 10$  (...).  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

Na maioria dos casos, a política SPP, com  $T = 0,5$  ano, demonstrou ser a que apresenta o menor risco de ocorrência de demanda não atendida. Já para as políticas IP, com  $T = 1$  mês, nota-se que  $Pr$  assume valores significativamente maiores, chegando a 0,118 no caso base. Resultado diferente só é verificado nos casos em que a probabilidade de indução de defeito na inspeção é muito baixa ou nula. Isso evidencia que a qualidade da inspeção, especialmente no que concerne ao nível de indução de defeito, também é um fator determinante para o risco de ocorrência de demandas não atendidas.

Por serem políticas bastante conservadoras, os custos associados são sempre maiores que os apresentados na análise anterior, em decorrência da alta frequência das ações de manutenção. Políticas de manutenção definidas somente com base neste critério podem, então, ser sobredimensionadas, levando a custos maiores e desperdício dos recursos da manutenção.

Tabela 10 – Análise da sensibilidade do modelo aos parâmetros que caracterizam a qualidade da manutenção (critério de referência: risco).

Caso	Parâmetros de qualidade				Política <i>MT</i> ótima					Política <i>SPP</i> ótima ( $M=1$ )			Política <i>IP</i> ótima ( $M=\infty$ )		
	<i>p</i>	<i>w</i>	<i>q</i>	<i>r</i>	<i>M</i>	<i>T</i> (anos)	<i>M.T</i> (anos)	<i>Pr*</i>	<i>C<sub>∞</sub></i> (un.)	<i>T</i> (anos)	<i>Pr*</i>	<i>C<sub>∞</sub></i> (un.)	<i>T</i> (anos)	<i>Pr*</i>	<i>C<sub>∞</sub></i> (un.)
1 Caso base	0,10	0,05	0,30	0,05	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,118	2,944
2 <i>p</i> maior	<b>0,15</b>	0,05	0,30	0,05	1	0,500	0,500	0,047	2,403	0,500	0,047	2,403	0,083	0,120	2,996
3 <i>p</i> menor	<b>0,05</b>	0,05	0,30	0,05	1	0,500	0,500	0,017	2,195	0,500	0,017	2,195	0,083	0,116	2,893
4 <i>p</i> nulo	<b>0</b>	0,05	0,30	0,05	1	0,500	0,500	0,002	2,091	0,500	0,002	2,091	0,083	0,114	2,843
5 <i>r</i> maior	0,10	0,05	0,30	<b>0,10</b>	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,204	4,341
6 <i>r</i> menor	0,10	0,05	0,30	<b>0,03</b>	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,078	2,357
7 <i>r</i> menor	0,10	0,05	0,30	<b>0,01</b>	6	0,083	0,500	0,024	3,052	0,500	0,032	2,299	0,083	0,035	1,758
8 <i>r</i> nulo	0,10	0,05	0,30	<b>0</b>	6	0,083	0,500	0,004	2,823	0,500	0,032	2,299	0,083	0,012	1,455
9 <i>w</i> maior	0,10	<b>0,10</b>	0,30	0,05	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,112	3,368
10 <i>w</i> menor	0,10	<b>0,01</b>	0,30	0,05	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,122	2,643
11 <i>w</i> nulo	0,10	<b>0</b>	0,30	0,05	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,124	2,576
12 <i>q</i> maior	0,10	0,05	<b>0,50</b>	0,05	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,142	3,132
13 <i>q</i> menor	0,10	0,05	<b>0,10</b>	0,05	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,100	2,810
14 <i>q</i> nulo	0,10	0,05	<b>0</b>	0,05	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,093	2,756
15 <i>w</i> e <i>q</i> menores	0,10	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	0,05	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,104	2,500
16 <i>w</i> e <i>q</i> nulos	0,10	<b>0</b>	<b>0</b>	0,05	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,097	2,372
17 inspeção melhor	0,10	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,068	1,953
18 inspeção perfeita	0,10	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	6	0,083	0,500	0,003	2,548	0,500	0,032	2,299	0,083	0,008	1,065
19 manutenção perfeita	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	6	0,083	0,500	0,000	2,905	0,500	0,002	2,091	0,083	0,001	1,309
20 política 2 estados	0,10	<b>0</b>	<b>1</b>	0,05	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,285	3,984
21 política 2 estados	0,10	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0,01</b>	1	0,500	0,500	0,032	2,299	0,500	0,032	2,299	0,083	0,114	1,995

Fonte: Esta pesquisa (2017).

### 3.3.4 Síntese conclusiva

Nesta seção foi apresentada uma aplicação numérica do modelo, e os critérios custo e risco foram analisados separadamente. Após a análise realizada, algumas observações são pertinentes:

- Quanto maior o valor de *CUD*, menor tende a ser o risco resultante da política ótima definida com base no critério custo. Caso o valor do *CUD* não seja bem representativo das consequências de uma demanda não atendida, seja porque é mal estimado ou porque as consequências são multidimensionais (representando riscos de diferentes naturezas), a política ótima definida com base no custo esperado pode ser subdimensionada com relação ao risco real. Por outro lado, uma política ótima definida com base no risco (enquanto probabilidade de ocorrência de demanda não atendida) pode ser sobredimensionada, acarretando maior custo e desperdício de recursos. Nesse caso, uma abordagem multicritério pode ser útil para dar apoio ao processo de decisão sobre a política de manutenção (conforme abordado no próximo capítulo).
- Com relação ao efeito dos aspectos de qualidade sobre o desempenho da manutenção, a partir dessa análise é possível responder, para o caso desta aplicação, as três perguntas indicadas por Alberti *et al.* (2017):
  - Quais aspectos de qualidade da manutenção tem maior impacto no desempenho do sistema?  
Especialmente o nível de indução de defeito nas inspeções, e o seu efeito torna-se ainda mais proeminente quando combinado com os erros de julgamento.
  - Vale a pena investir em manutenção de maior qualidade?  
Sim. Com tal investimento é possível obter um cenário mais econômico em longo prazo e também com menor risco associado.
  - Quais aspectos de qualidade devem ser priorizados nesse investimento?  
O investimento deve ser direcionado principalmente para a melhoria da qualidade da inspeção, especialmente no que concerne a redução da indução de defeitos, e se combinada a redução dos erros de julgamento, os resultados são mais positivos ainda.

## 4 ABORDAGEM MULTICRITÉRIO

Modelos de apoio a decisão multicritério apresentam uma grande contribuição para a tomada de decisão em contextos que envolvem múltiplos objetivos, por vezes conflitantes, e que não podem ser traduzidos para uma única métrica de avaliação. Esse cenário é frequentemente verificado em problemas de decisão sobre manutenção em sistemas de produção de serviços, e também em problemas de decisão sobre intervenções em sistemas de abastecimento de água, ambos contextos abordados neste trabalho.

No capítulo anterior é apresentado um modelo para representação de uma política de manutenção para sistemas de prontidão sujeitos a demandas que ocorrem de acordo com um processo homogêneo de Poisson. Verifica-se que, quanto maior o custo associado a ocorrência de uma demanda não atendida (*CUD*), mais conservadora tende a ser a política de manutenção ótima definida com base no critério custo ( $C_\infty$ ), consequentemente reduzindo a probabilidade de ocorrência de eventos dessa natureza num horizonte de tempo pré-estabelecido (*Pr*). Porém, o valor de *CUD* pode não ser bem representativo das consequências de eventos de demanda não atendida; nesse caso, uma abordagem multicritério pode auxiliar na definição da melhor relação de compromisso entre esses critérios, de acordo com a estrutura de preferências do decisor.

Neste capítulo é proposta uma abordagem multicritério para definição de política de manutenção para sistemas de prontidão, fazendo uso do modelo matemático desenvolvido no capítulo anterior. O desenvolvimento do modelo multicritério é ilustrado por uma aplicação no contexto das válvulas de isolamento de redes de distribuição de água, e alguns comentários sobre possíveis aplicações dessa abordagem a outras situações são tecidos ao longo do texto.

### 4.1 Cenário da aplicação

Para a construção do modelo multicritério, considerou-se uma válvula de isolamento de uma rede de distribuição de água, instalada em uma tubulação que opera em alta pressão, em um local de fácil acesso, e em uma região sujeita a risco de sabotagem e risco de contaminação da água por dejetos industriais em caso de danos a estrutura da rede.

A ocorrência de uma demanda não atendida não apenas significa a necessidade de isolamento de uma área maior, deixando mais unidades consumidoras fora de serviço e por mais tempo, trazendo transtornos à sociedade e levando a perdas de faturamento para a empresa, como também representa um risco ao ambiente, a estrutura da rede e ao patrimônio de terceiros,

conforme ilustrado nos capítulos 2 e 3. Além disso, a ocorrência de um evento dessa natureza pode ocasionar diversos transtornos operacionais, com a urgência de se estabelecer um novo plano de contenção e remanejar recursos para a sua execução. Diante desse cenário, é importante para a empresa que o risco de ocorrência de uma demanda não atendida seja reduzido a níveis satisfatórios, porém sem incorrer em alto custo e desperdício dos recursos da manutenção.

No estudo de caso realizado, verificou-se que a estimativa do custo decorrente de uma demanda não atendida é pouco representativa das consequências reais desses eventos. Na empresa em questão, normalmente tal estimativa é feita com base no número médio de unidades consumidoras na área extra que precisa ficar fora de serviço por conta da falha da válvula de isolamento, multiplicado pelo consumo médio e por uma tarifa de referência (tarifa social), que é mais baixa da tabela de tarifas praticada pela empresa. Tal estimativa, além de desconsiderar as reais características das unidades consumidoras, não contempla qualquer aspecto dos outros riscos envolvidos.

Considerando isso, para aplicação do modelo multicritério, optou-se por definir  $CUD=0$ ; dessa forma, a estimativa do custo esperado por unidade de tempo ( $C_{\infty}$ ) diz respeito apenas ao custo esperado das ações de manutenção. A outra medida de interesse é a probabilidade de ocorrência de pelo menos uma demanda não atendida em um horizonte de cinco anos ( $Pr$ ); esta medida oferece uma boa noção da vulnerabilidade do sistema e, junto a noção das consequências de eventos dessa natureza, compõe a percepção de risco por parte do decisor.

A análise apresentada por este trabalho se limita a considerar o valor de  $Pr$ , que neste trabalho é denominado “risco” (respeitando definição apresentada por AVEN, 2012). Alguns trabalhos apresentam métodos para avaliar o impacto de falhas em válvulas de isolamento, que podem ser utilizados como complementos importantes quando da aplicação do modelo aqui apresentado a um contexto real (JUN *et al.*, 2008; GIUSTOLISI, KAPELAN & SAVIC, 2008; LIU *et al.*, 2007).

Os demais valores dos parâmetros do modelo utilizados para esta aplicação são os mesmos apresentados para o caso base na seção 3.3.1.

## **4.2 Construindo o modelo multicritério**

Para a construção do modelo de apoio a decisão multicritério, é necessário um procedimento estruturado, que garanta que o decisor tenha plena ciência do problema em

questão, e que seja capaz de mapear a estrutura de preferências desse decisor, estabelecendo um bom equilíbrio entre simplicidade e precisão.

O procedimento proposto por De Almeida (2013), esquematizado na Figura 12, foi utilizado como referência para a estruturação das próximas subseções. Este procedimento pode ser dividido em três fases principais: fase preliminar, modelagem de preferências e aplicação do método multicritério, e finalização. Para desenvolvimento do modelo multicritério foram utilizados dados simulados, sendo o foco principal deste capítulo a aplicação do método multicritério, mas vale ressaltar que todas as fases são cruciais para um bom desenvolvimento de um modelo de apoio a decisão.

#### 4.2.1 Notação comum

Para além da notação apresentada na seção 3.2.2, neste capítulo também é utilizada a notação apresentada na Tabela 11.

*Tabela 11 – Notação utilizada no desenvolvimento do capítulo 4.*

$\Theta$	estado da natureza
$\pi(\theta)$	distribuição de probabilidade dos possíveis estados da natureza
$U_c$	função utilidade para custo
$U_r$	função utilidade para risco
$U$	função utilidade multiatributo
$k_c$	constante de escala para custo
$k_r$	constante de escala para risco

*Fonte: Esta pesquisa (2017).*

#### 4.2.2 Fase preliminar

##### 4.2.2.1 Identificação dos objetivos e critérios

O objetivo básico da política de manutenção de um sistema de prontidão é reduzir os transtornos decorrentes de demandas não atendidas devido a falhas do sistema, com custo de manutenção reduzido e sem desperdício de recursos. Utilizando o método da hierarquia de objetivos, apresentado por Keeney & Raiffa (1976), e considerando referências obtidas a partir da literatura, foi obtida a hierarquia apresentada na Figura 26.

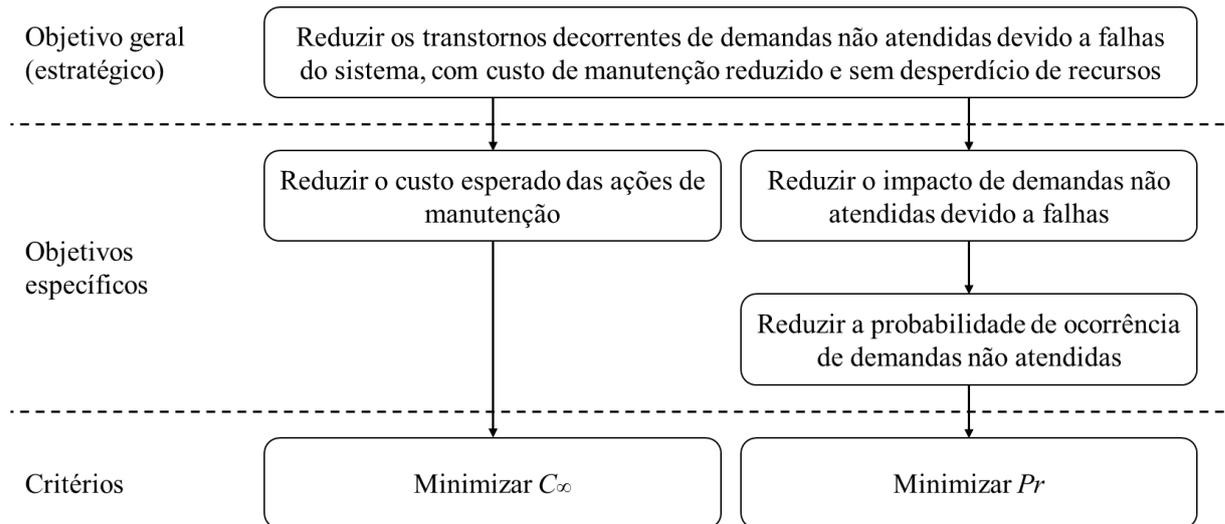


Figura 26 - Hierarquia de objetivos do problema.  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

No modelo apresentado, um dos pressupostos considerados é que durante as ações de manutenção, o processo de chegada de demandas é interrompido. Em alguns cenários, tal interrupção pode ser resultado de uma indisponibilidade parcial ou total do sistema produtivo principal. Nesses casos, o nível de indisponibilidade do sistema produtivo principal devido à manutenção do sistema de prontidão (que pode ser estimado como  $ES(T,M)/EL(T,M)$ ) pode ser incorporado ao problema como uma restrição ou como um terceiro critério.

#### 4.2.2.2 Identificação do espaço de ações e da problemática

O objetivo do modelo é apoiar a definição de uma política de manutenção, logo, trata-se de uma problemática de escolha. O conjunto de alternativas consiste em todas as combinações possíveis de  $M$  e  $T$  ( $M \in \mathbb{N}$  e  $T \in \mathbb{R}_+$ ), tal que  $T \geq 1$  mês e  $M.T \geq 6$  meses. Trata-se de um conjunto de alternativas contínuo, o que caracteriza este problema como um problema de otimização clássico (DE ALMEIDA *et al.*, 2015b).

#### 4.2.2.3 Identificação do estado da natureza

O estado da natureza ( $\theta$ ) corresponde aos aspectos que não podem ser controlados pelo decisor, mas que influenciam no resultado obtido, ou seja, os parâmetros de entrada do modelo matemático, que permite estimar os resultados para cada critério em função das variáveis de decisão da política de manutenção.

De Almeida *et al.* (2015b) destacam que, em muitos casos, o estado da natureza de um problema é incerto, e pode ser representado por uma distribuição de probabilidade  $\pi(\theta)$ . A

Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) apresenta meios de incorporar essa incerteza ao processo decisório. Nesta aplicação, porém, para fins de modelagem, assume-se que há um conhecimento completo sobre o estado da natureza do problema.

#### 4.2.3 Modelagem de preferências

A abordagem multicritério proposta é baseada na aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). Este método é bastante adequado para problemas na área de manutenção e confiabilidade, quando as seguintes condições são verificadas para o espaço de consequências analisado (DE ALMEIDA, 2013; DE ALMEIDA, FERREIRA & CAVALCANTE, 2015):

- A estrutura de preferências do decisor pode ser completamente representada através de relações de preferência estrita e indiferença (estrutura P,I);
- A ordem de preferência para diferentes valores de um mesmo critério não se altera com a variação dos valores relativos a outros critérios (independência preferencial);
- A racionalidade do decisor é compatível com a lógica compensatória.

A aplicação do método ao problema de decisão em manutenção pode ser dividida em três fases principais: delimitação do espaço de consequências, avaliação intracritério e avaliação intercritério, detalhadas a seguir.

##### 4.2.3.1 Delimitação do espaço de consequências

Para formulação do modelo multicritério, é imprescindível a delimitação do espaço de consequências, de forma que contemple apenas as consequências associadas às alternativas não dominadas do espaço de ações (fronteira de Pareto), que são as que verdadeiramente interessam para o decisor.

Em problemas como o apresentado, com dois critérios que se deseja minimizar e espaço de alternativas contínuo, o espaço de consequências pode ser delimitado da seguinte forma: estimadas a alternativa  $A_1$ , que minimiza  $C_\infty$  e tem como resultado  $(C_\infty^*, Pr^\theta)$ , e a alternativa  $A_2$ , que minimiza  $Pr$  e tem como resultado  $(C_\infty^\theta, Pr^*)$ , o espaço de consequências a ser analisado no modelo multicritério é delimitado conforme indicado na Tabela 12.

Tabela 12 – Ilustração do processo de delimitação do espaço de consequências.

Delimitação do espaço de consequências		
Critério	Limite inferior	Limite superior
Custo	$C_{\infty}^*$	$C_{\infty}^0$
Risco	$Pr^*$	$Pr^0$

Fonte: Esta pesquisa (2017).

A justificativa é simples: todas as alternativas do espaço de consequências apresentam custo maior ou igual a  $C_{\infty}^*$ , logo, qualquer alternativa que apresente um valor de  $Pr$  maior que  $Pr^0$  será uma alternativa dominada, portanto não interessando ao problema de decisão: qualquer alternativa com resultado ( $C^x \geq C_{\infty}^*$ ,  $Pr^x > Pr^0$ ) é dominada pela alternativa que minimiza o custo. A mesma lógica se aplica a  $Pr$  com relação a  $C_{\infty}$ .

Os seguintes resultados foram obtidos para a aplicação em questão:

- Minimização do custo: ( $C_{\infty}^* = 0,652$  un.,  $Pr^0 = 0,408$ ) para  $M = 1$  e  $T = 2,992$  anos.
- Minimização do risco: ( $C_{\infty}^0 = 2,136$  un.,  $Pr^* = 0,032$ ) para  $M = 1$  e  $T = 0,500$  ano.

Então, o espaço de consequências é delimitado de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13 - Delimitação do espaço de consequências para a aplicação do modelo multicritério.

Delimitação do espaço de consequências		
Critério	Limite inferior	Limite superior
Custo	0,652 un.	2,136 un.
Risco	0,032	0,408

Fonte: Esta pesquisa (2017).

#### 4.2.3.2 Avaliação intracritério – custo

A avaliação intracritério consiste na modelagem das preferências do decisor para cada critério separadamente, a fim de estimar as suas funções utilidade unidimensionais utilizando uma escala de referência normalizada.

Usualmente, a normalização da escala para cada critério é feita da seguinte forma: dentro dos limites do espaço de consequências analisado, para o pior valor (menos preferível) é vinculada utilidade igual a 0 (zero), e para o melhor valor, utilidade igual a 1 (um).

Keeney & Raiffa (1976) propõem um método para obtenção de alguns pontos de utilidade intermediários, a partir dos quais a função pode então ser ajustada. Esses pontos são obtidos através da execução de procedimento estruturado e interativo, de forma que o decisor indique o equivalente certo para algumas loterias entre valores com utilidades conhecidas: se  $U_c(C_\infty^*)$  é igual a 1 e  $U_c(C_\infty^0)$  é igual a 0, então o equivalente certo de uma loteria  $[C_\infty^*, 0,5; C_\infty^0, 0,5]$  possui utilidade igual a 0,5. Seguindo essa lógica sucessivamente, é possível estimar uma série de pontos intermediários.

Outro fator importante a ser observado é o comportamento do decisor com relação ao risco, que deve ser considerado na escolha do formato de função a ser ajustado para estimação da função utilidade.

Considerando que, através de um procedimento de elicitación estruturado, foram obtidos os pontos intermediários para o critério custo apresentados na Tabela 14, e considerando ainda que foi observado que o decisor é avesso risco, com grau de aversão aproximadamente constante ao longo do espaço de consequências analisado, um bom ajuste para a função utilidade do custo é apresentado na equação (4.1). Na Figura 27 é apresentado o gráfico da utilidade unidimensional do custo.

Tabela 14 - Pontos intermediários da função utilidade unidimensional para custo.

$C_\infty$ (un.)	Utilidade
0,652	1,00
1,300	0,75
1,650	0,50
1,950	0,25
2,136	0,00

Fonte: Esta pesquisa (2017).

Função utilidade ajustada:

$$U_c(C_\infty) = 1,111 - 0,044 \cdot \exp(1,545 \cdot C_\infty) \quad (4.1)$$

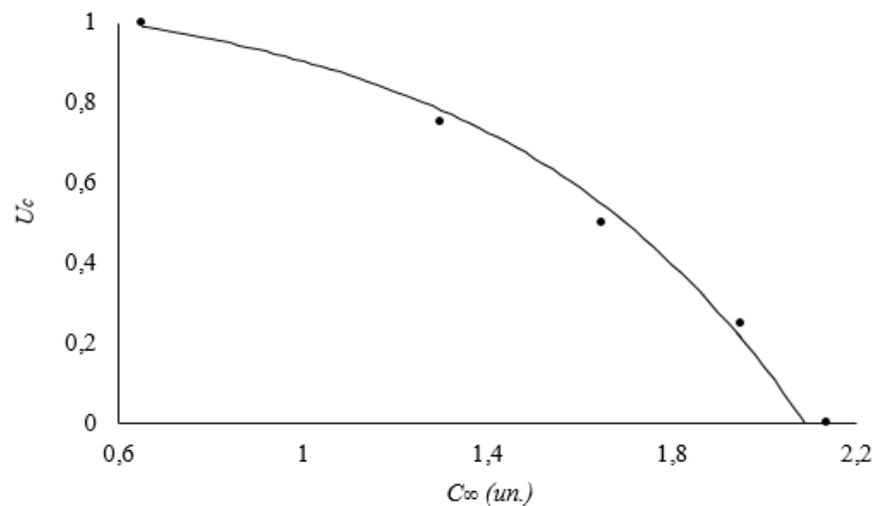


Figura 27 –  $U_c$  em função de  $C_\infty$ : função ajustada (–) e pontos intermediários obtidos na elicitaco ( $\bullet$ ).  
Fonte: Esta pesquisa (2017).

#### 4.2.3.3 Avaliaco intracritério – risco

Em se tratando da avaliacão do critério risco, cabem algumas observaces em especial.

Em problemas no contexto da manuteno, uma relao  nitidamente verificada: quanto menor o risco de ocorrência de falhas que se busca, maior o custo decorrente da alta frequência das aes de manuteno.

De acordo com o princípio ALARP,  possível classificar riscos em três categorias: risco negligenciável, risco tolerável e risco inaceitável. A região de risco tolerável (ALARP) inclui riscos os quais usualmente seria preferível não ter, mas que são assim considerados em funo dos ganhos obtidos ao aceitar tal situao (DE ALMEIDA *et al.*, 2015b). Desse modo,  plausível considerar a realizao da modelagem de preferências apenas para as alternativas contidas na zona de risco tolerável (contanto que o custo de alternativas de risco negligenciável não seja menor).

Nesta aplicao, a medida de risco considerada  a probabilidade de ocorrência de pelo menos uma demanda não atendida num horizonte de cinco anos, medida que oferece uma boa noo do nível de vulnerabilidade do sistema. No contexto abordado não há uma definio da região ALARP imposta por regulamentaces, então a modelagem de preferências  realizada considerando todo o conjunto de alternativas não dominadas.

Considerando que o decisor  quase indiferente para riscos de valor inferior a 0,1, e que foram obtidos os pontos intermediários apresentados na Tabela 15; considerando ainda que foi observado que o decisor  avesso ao risco, e com grau de aversão aproximadamente constante

ao longo do espaço de consequências analisado, um bom ajuste para a função utilidade do risco é apresentado na equação (4.2). Na Figura 28 é apresentado o gráfico da utilidade unidimensional do risco.

Tabela 15 - Pontos intermediários da função utilidade unidimensional para risco.

<i>Pr</i> (para 5 anos)	Utilidade
0,032	1,00
0,100	0,95
0,220	0,75
0,300	0,50
0,370	0,25
0,408	0,00

Fonte: Esta pesquisa (2017).

Função utilidade ajustada:

$$U_r(\text{Pr}) = 1,111 - 0,090 \cdot \exp(6,184 \cdot \text{Pr}) \quad (4.2)$$

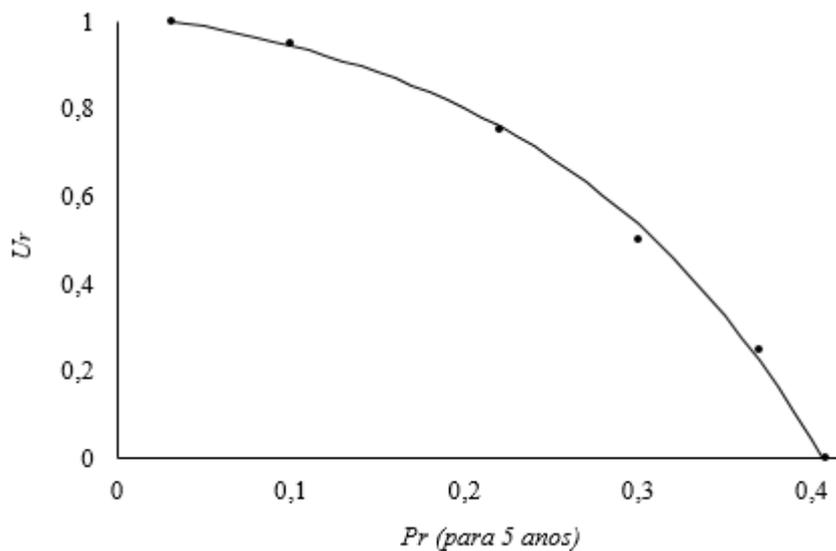


Figura 28 –  $U_r$  em função de  $Pr$ : função ajustada (–) e pontos intermediários obtidos na elicitación (•).

Fonte: Esta pesquisa (2017).

#### 4.2.3.4 Avaliação intercritério

Em MAUT, a avaliação intercritério consiste na modelagem das preferências do decisor tendo em vista a obtenção da função utilidade multiatributo, que agrega os diferentes critérios em um critério único de síntese.

Algumas formas funcionais de agregação das funções utilidade unidimensionais podem ser consideradas, desde que a estrutura de preferências do decisor seja compatível com algumas condições de independência preferencial. A validação de tais condições deve ser feita por meio de um procedimento estruturado e que inclua testes de consistência, conforme proposto por Keeney & Raiffa (1976).

Considerando que a estrutura de preferências de decisor seja compatível com a condição de independência aditiva, é possível utilizar a função de agregação aditiva, apresentada na equação (4.3).

$$U(C_{\infty}, Pr) = k_c \cdot U_c(C_{\infty}) + k_r \cdot U_r(Pr) \quad (4.3)$$

Para a determinação das constantes de escala, deve ser realizado um *trade-off* entre os critérios, explorando a racionalidade compensatória adotada em MAUT. O procedimento é apresentado de forma resumida a seguir:

- Primeiro, o decisor é questionado sobre a sua preferência entre duas alternativas:  
 $A_1 = (C_{\infty}^* = 0,652 \text{ un.}, Pr^0 = 0,408)$  e  $A_2 = (C_{\infty}^0 = 2,136 \text{ un.}, Pr^* = 0,032)$ .
- Considerando que  $A_2$  é preferível a  $A_1$ , então  $U(A_2) > U(A_1)$  e, conseqüentemente,  $k_r > k_c$ .
- Então, o decisor é solicitado a indicar para qual ajuste no valor de  $Pr$  na alternativa  $A_1$  ele se mostra indiferente entre as duas alternativas.
- Considerando que foi obtido o seguinte resultado:  $A_1'$  é indiferente a  $A_2$ , se  $A_1' = (C_{\infty}^* = 0,652 \text{ un.}, Pr = 0,25)$ , então é possível determinar os valores das constantes de escala resolvendo o sistema de equações (4.4).

$$\begin{aligned} k_c + k_r \cdot U_r(0,25) &= k_r \\ k_c + k_r &= 1 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Obtém-se, então, a função de agregação aditiva apresentada na equação (4.5).

$$U(C_{\infty}, Pr) = 0,237 \cdot U_c(C_{\infty}) + 0,763 \cdot U_r(Pr) \quad (4.5)$$

Como  $C_\infty$  e  $Pr$  são funções das variáveis de decisão da política de manutenção ( $M$  e  $T$ ), a função utilidade multiatributo pode ser reescrita conforme a equação (4.6).

$$U(T, M) = 0,237.U_c(T, M) + 0,763.U_r(T, M) \quad (4.6)$$

#### 4.2.4 Finalização – avaliação das alternativas e análise de sensibilidade

Em se tratando de um problema de otimização clássico, a política de manutenção recomendada pelo modelo multicritério é definida com base na solução do seguinte problema de programação matemática:

$$\begin{aligned} & \text{Max } U(T, M) \\ & \text{Sujeito a:} \\ & T \geq 1 \text{ mês} \\ & M.T \geq 6 \text{ meses} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Os resultados do problema de otimização e da análise de sensibilidade são apresentados na Tabela 16.

A aplicação do modelo multicritério resulta na indicação de uma política de substituição preventiva pura e conservadora, com um baixo nível de risco associado. Tal resultado é esperado, haja vista as tendências observadas na aplicação realizada na seção 3.3, onde se verifica que, dados os níveis de qualidade da inspeção para o caso base (especialmente no que concerne a probabilidade de indução de defeito), tal prática torna-se desvantajosa, tanto do ponto de vista do custo quanto do ponto de vista do risco, pois pode contribuir para reduzir a confiabilidade do sistema.

*Tabela 16 - Resultado e análise de sensibilidade.*

Constantes de escala		Política de manutenção com a máxima utilidade multiatributo				
$k_c$	$k_r$	$M$	$T$ (anos)	$U^*$	$C_\infty$ (un.)	$Pr$
0,237	0,763	1	0,856	0,905	1,321	0,098
0,230	0,770	1	0,849	0,906	1,330	0,097
0,220	0,780	1	0,840	0,908	1,343	0,095
0,240	0,760	1	0,859	0,904	1,318	0,099
0,250	0,750	1	0,868	0,903	1,306	0,101

*Fonte: Esta pesquisa (2017).*

Em uma análise de sensibilidade, verifica-se que uma variação das constantes de escala em torno dos valores estimados não levou a uma alteração significativa no resultado, o que indica que a recomendação obtida é uma solução boa e robusta com relação a possíveis erros do modelo.

### 4.3 Investindo em manutenção de maior qualidade

Na seção 3.3.2.2 é apresentada uma discussão sobre as vantagens de se investir em manutenção de maior qualidade, considerando as economias que podem ser obtidas em longo prazo. Nesta seção, é proposta uma forma de análise semelhante, realizada a partir de uma perspectiva multicritério.

Para essa análise, propõe-se para delimitação do espaço de consequências a ser considerado para a modelagem de preferências do decisor:

- Primeiro, é necessário estabelecer todos os cenários possíveis de serem obtidos com o investimento em manutenção de maior qualidade.
- Para cada cenário, é necessário delimitar o espaço de consequências associado, conforme procedimento apresentado na seção 4.2.3.1.
- O espaço de consequências a ser considerado na análise deve ser definido de forma que compreenda os espaços de consequências característicos de todos os cenários abordados. Dessa forma, é possível modelar as preferências do decisor com relação a consequências obtidas nos diferentes cenários.

Os cenários considerados para esta análise são apresentados na Tabela 17. O caso base, que representa o cenário inicial, é apresentado na linha superior da tabela, e nas demais linhas são apresentados casos onde alguns dos aspectos de qualidade são melhorados, com o aumento de alguns dos custos da manutenção. Os parâmetros de qualidade e os custos alterados com relação ao caso base são destacados em negrito. São apresentados os resultados relativos a política que minimiza o custo e a política que minimiza o risco, para a delimitação do espaço de consequências.

Considerando que, para o espaço de consequências analisado, a modelagem da estrutura de preferências do decisor foi realizada utilizando o mesmo procedimento apresentado na seção anterior, e apresenta os seguintes resultados:

- Função utilidade unidimensional do custo:

$$U_c(C_\infty) = 1,111 - 0,073 \cdot \exp(0,747 \cdot C_\infty) \quad (4.8)$$

- Função utilidade unidimensional do risco:

$$U_r(\text{Pr}) = 1,111 - 0,097 \cdot \exp(5,922 \cdot \text{Pr}) \quad (4.9)$$

- Função utilidade multiatributo:

$$U(C_\infty, \text{Pr}) = 0,398 \cdot U_c(C_\infty) + 0,602 \cdot U_r(\text{Pr}) \quad (4.10)$$

É possível, então, definir a política de manutenção com a máxima utilidade para cada cenário analisado, para posterior comparação dos resultados obtidos. Os resultados são apresentados na Tabela 18.

A partir da Tabela 18, é possível definir quais cenários são mais vantajosos, indicando assim o curso de ação que deve ser tomado, no que concerne ao investimento em qualidade da manutenção. Observa-se que o efeito mais positivo provém do investimento na redução do nível de indução de defeitos, que também apresenta bons resultados quando acompanhado do investimento na redução dos erros de julgamento.

Para a continuidade da análise, propõe-se que, escolhido o cenário de melhoria, seja realizada uma nova avaliação multicritério considerando apenas o espaço de consequências relativo ao cenário em questão, a fim de fazer testes de consistência e validar a política de manutenção recomendada.

Partindo da perspectiva multicritério, para esta aplicação, novamente é possível responder as perguntas indicadas por Alberti *et al.* (2017):

- Vale a pena investir em manutenção de maior qualidade?

Sim. Com tal investimento é possível obter um cenário mais vantajoso com relação a custo e risco simultaneamente.

- Quais aspectos de qualidade devem ser priorizados nesse investimento?

O investimento deve ser direcionado principalmente para a melhoria da qualidade da inspeção, especialmente no que concerne a redução da indução de defeitos, que se combinada a redução dos erros de julgamento, pode obter resultados mais positivos ainda.

Tabela 17 – Delimitação do espaço de consequências para análise multicritério de cenários de investimento em manutenção de maior qualidade.

	Parâmetros de qualidade				Custos				Política de manutenção que minimiza $C_{\infty}$				Política de manutenção que minimiza $Pr$			
	$p$	$w$	$q$	$r$	$c_i$ (un.)	$c_p$ (un.)	$c_d$ (un.)	$c_f$ (un.)	$M$	$T$ (anos)	$C_{\infty}^*$ (un.)	$Pr^0$	$M$	$T$ (anos)	$C_{\infty}^0$ (un.)	$Pr^*$
Cenário 1 (caso base)	0,10	0,05	0,30	0,05	0,04	1,00	1,50	3,00	1	2,992	<b>0,652</b>	0,408	1	0,500	2,136	0,032
Cenário 2	0,10	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	0,05	<b>0,08</b>	1,00	1,50	3,00	1	3,029	0,667	0,413	1	0,500	2,216	0,032
Cenário 3	0,10	0,05	0,30	<b>0,01</b>	<b>0,08</b>	1,00	1,50	3,00	1	3,029	0,667	0,413	6	0,083	3,399	0,024
Cenário 4	0,10	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	<b>0,01</b>	<b>0,12</b>	1,00	1,50	3,00	1	3,066	0,681	<b>0,418</b>	6	0,083	<b>3,662</b>	0,021
Cenário 5	<b>0,05</b>	0,05	0,30	0,05	0,04	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,60</b>	1	2,877	0,729	0,338	1	0,500	2,515	<b>0,017</b>
Cenário 6	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	0,05	<b>0,08</b>	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,60</b>	1	2,909	0,744	0,343	1	0,500	2,595	<b>0,017</b>
Cenário 7	<b>0,05</b>	0,05	0,30	<b>0,01</b>	<b>0,08</b>	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,60</b>	1	2,909	0,744	0,343	1	0,500	2,595	<b>0,017</b>
Cenário 8	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	<b>0,01</b>	<b>0,12</b>	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,60</b>	1	2,940	0,759	0,348	1	0,500	2,675	<b>0,017</b>
Delimitação do espaço de consequências:					<b>Critério</b>				<b>Limite inferior</b>				<b>Limite superior</b>			
					Custo ( $C_{\infty}$ )				0,652 un.				3,662 un.			
					Risco ( $Pr$ )				0,017				0,418			

Fonte: Esta pesquisa (2017).

Tabela 18 – Avaliação multicritério dos cenários de investimento em manutenção de maior qualidade.

	Parâmetros de qualidade				Custos				Política de manutenção com utilidade máxima					
	<i>p</i>	<i>w</i>	<i>q</i>	<i>r</i>	<i>c<sub>i</sub></i> (un.)	<i>c<sub>p</sub></i> (un.)	<i>c<sub>d</sub></i> (un.)	<i>c<sub>f</sub></i> (un.)	<i>M</i>	<i>T</i> (anos)	<i>M.T</i> (anos)	<i>U*</i>	<i>C<sub>∞</sub></i> (un.)	<i>Pr</i>
Cenário 1 (caso base)	0,10	0,05	0,30	0,05	0,04	1,00	1,50	3,00	1	0,756	0,756	0,931	1,469	0,078
Cenário 2	0,10	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	0,05	<b>0,08</b>	1,00	1,50	3,00	1	0,770	0,770	0,928	1,498	0,081
Cenário 3	0,10	0,05	0,30	<b>0,01</b>	<b>0,08</b>	1,00	1,50	3,00	10	0,191	1,910	0,944	1,264	0,078
Cenário 4	0,10	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	<b>0,01</b>	<b>0,12</b>	1,00	1,50	3,00	10	0,214	2,140	0,945	1,281	0,074
Cenário 5	<b>0,05</b>	0,05	0,30	0,05	0,04	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,60</b>	1	0,984	0,984	0,942	1,345	0,072
Cenário 6	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	0,05	<b>0,08</b>	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,60</b>	1	1,000	1,000	0,940	1,366	0,074
Cenário 7	<b>0,05</b>	0,05	0,30	<b>0,01</b>	<b>0,08</b>	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,60</b>	7	0,259	1,813	0,943	1,279	0,078
Cenário 8	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	<b>0,01</b>	<b>0,12</b>	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,60</b>	7	0,272	1,904	0,944	1,292	0,074

Fonte: Esta pesquisa (2017).

#### 4.4 Síntese conclusiva

O modelo apresentado no capítulo 3 apresenta uma grande contribuição, ao considerar os aspectos de qualidade da manutenção para uma estimativa do custo e risco resultantes da adoção de uma política de manutenção para sistemas de prontidão. A abordagem multicritério, por sua vez, permite incorporar elementos de diferentes naturezas ao processo decisório na manutenção, trazendo maior riqueza de informações.

Por mais que seja desenvolvida a partir de uma série de pressupostos e simplificações, a abordagem apresentada neste trabalho pode ser utilizada de modo a obter orientações importantes, e por vezes não triviais, para as decisões a respeito dos cursos de ação a serem tomados com relação a manutenção de sistemas de prontidão.

Na aplicação realizada, por exemplo, foi possível verificar que, mesmo que a probabilidade de ocorrência seja baixa, a possibilidade de indução de defeito na inspeção apresenta um grande impacto no desempenho da política de manutenção. Dessa forma, para o cenário analisado, o formato de política de substituição preventiva pura é o mais adequado, mesmo que represente um certo nível de desperdício de recursos. Então, a fim de melhorar os resultados da manutenção, o primeiro aspecto de qualidade que deve ser atacado é a qualidade da inspeção, de forma a garantir uma redução na frequência de eventos de indução de defeito. Essas orientações foram obtidas com a aplicação do modelo considerando apenas o critério custo, bem como com a aplicação do modelo multicritério.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta contribuições importantes para o processo de definição de política de manutenção para sistemas de prontidão. Primeiro é apresentado um modelo para uma política mista de inspeção e substituição preventiva, que considera diferentes aspectos de qualidade da manutenção, para estimação do custo esperado e risco em função das variáveis de decisão da política de manutenção. O modelo apresentado é importante no sentido de que, se algum destes aspectos de falha da qualidade da manutenção é verificado na realidade mas ignorado na modelagem matemática, alguns equívocos podem ser cometidos.

Considerando que nem sempre medidas de custo são bem representativas das consequências associadas a eventos de demanda não atendida, foi proposta uma abordagem multicritério para definição da política de manutenção, que permite tratar de forma mais adequada a multidimensionalidade do problema. Com uma aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), é possível obter uma boa relação de compromisso entre os critérios custo e risco.

Para a aplicação numérica do modelo, foi possível responder às perguntas apresentadas na introdução deste trabalho: quais aspectos de qualidade da manutenção tem maior impacto no desempenho do sistema? Vale a pena investir em manutenção de maior qualidade? Quais aspectos devem ser priorizados neste investimento? Isso mostra que o modelo apresentado pode ser utilizado de forma a obter orientações muito úteis, e por vezes não triviais, para o processo de decisão sobre a manutenção.

Vale ressaltar que no estudo de caso sobre manutenção de válvulas de isolamento, a indução de defeitos foi um ponto bastante ressaltado pelos entrevistados, o que deixou claro que este aspecto não poderia ser ignorado no modelo matemático. Porém, nem sempre uma percepção clara e possível de ser traduzida em estimativas confiáveis é verificada; nesse sentido, pode ser de grande utilidade a aplicação do *snapshot modelling*, com o objetivo de realizar uma investigação minuciosa sobre as tendências que afetam a operação e manutenção do sistema (CHRISTER & WHITELAW, 1983).

### 5.1 Dificuldades e limitações

Na aplicação numérica, é possível observar que o modelo pode ser bastante sensível aos parâmetros de qualidade da manutenção, especialmente a probabilidade de indução de defeito na inspeção. Como o modelo matemático é uma aproximação da realidade, é plausível

considerar que um certo grau de incerteza associado aos valores mais adequados dos parâmetros que caracterizam o estado da natureza.

Para definição da política de manutenção com base em apenas um critério de avaliação, uma análise da sensibilidade dos resultados a variação dos parâmetros de entrada do modelo pode fornecer as informações necessárias para uma tomada de decisão. Já para a abordagem multicritério, em MAUT é possível levar em consideração a distribuição de probabilidade *a priori* do estado da natureza  $\pi(\theta)$ , de forma que o objetivo do decisor é, então, maximizar a utilidade esperada, conforme indicado em (5.1) (DE ALMEIDA, 2005). Porém, tal procedimento pode requerer um esforço computacional muito significativo, inviabilizando a obtenção de um bom resultado.

$$\text{Max}_{a_i} \int_{\theta} U(a_i, \theta) \pi(\theta) \quad (5.1)$$

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Segundo De Almeida (2012), em muitos problemas reais, a definição da política de manutenção deve satisfazer restrições operacionais, de forma que o espaço de alternativas possíveis pode ser baseado em intervalos de tempo discretos, como meses, semanas, e assim por diante. Em contextos onde se verifica tal condição, para aplicação de uma abordagem multicritério baseada em MAUT, pode ser interessante o uso do *FITradeoff* para definir a alternativa com a melhor relação de compromisso entre os critérios, visto que essa ferramenta exige menor esforço cognitivo por parte do decisor (DE ALMEIDA *et al.*, 2015a).

No contexto abordado (válvulas de isolamento) assim como em outras situações, as decisões sobre o planejamento da manutenção de ativos não são tomadas por um decisor individual, mas envolvem um grupo de decisores, sendo esta uma oportunidade para a aplicação de métodos de apoio a decisão em grupo.

Além disso, novos modelos podem ser desenvolvidos para outros contextos (como para sistemas principais, por exemplo) utilizando os mesmos princípios considerados para desenvolvimento do modelo apresentado neste trabalho, contribuindo para uma análise mais completa dos riscos relacionados a eventos de falha.

## REFERÊNCIAS

- ASCHER, H.; FEINGOLD, H. *Repairable Systems Reliability*. New York, Marcel Dekker, 1984, 240 p.
- AGATHOKLEOUS, A.; CHRISTODOULOU, C.; CHRISTODOULOU, S.E. Topological Robustness and Vulnerability Assessment of Water Distribution Networks. *Water Resources Management*, 31: 4007-4021, 2017.
- ALASWAD, S.; XIANG, Y. A Review on Condition-Based Maintenance Optimization Models for Stochastically Deteriorating System. *Reliability Engineering and System Safety*, 157: 54-64, 2017.
- ALBERTI, A.R.; CAVALCANTE, C.A.V.; SCARF, P.; OLIVEIRA, A.L. Modelling inspection and replacement quality for a protection system. *Reliability Engineering and System Safety*, 2018 (no prelo).
- ALRABGHI, A.; TIWARI, A. State of the art in simulation-based optimization for maintenance systems. *Computers & Industrial Engineering*, 82: 167-182, 2015.
- ANSELL, J.I.; ARCHIBALD, T.W.; THOMAS, L.C. The elixir of life: using a maintenance, repair and replacement model based on virtual and operating age in the water industry. *IMA Journal of Management Mathematics*, 15: 151-160, 2004.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. *Pesquisa Operacional: para cursos de engenharia*. Rio de Janeiro, Elsevier, 2007, 524p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 5462/1994. Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 12218/1994. Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro.
- AVEN, T. The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering and System Safety*, 99: 33-44, 2012.
- AVEN, T., JENSEN, U. *Stochastic Models in Reliability*. New York, Springer-Verlag New York, 1999, 270p.

- AVEN, T.; JENSEN, U. A General Minimal Repair Model, *Journal of Applied Probability*, 37(1): 187-197, 2000.
- BAKER, R.D.; WANG, W. Estimating the delay-time distribution of faults in repairable machinery from failure data. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry*, 3: 259-281, 1992.
- BERRADE, M.D.; CAVALCANTE, C.A.V.; SCARF, P.A. Maintenance scheduling of a protection system subject to imperfect inspection and replacement. *European Journal of Operational Research*, 218: 716-725, 2012.
- BERRADE, M.D.; SCARF, P.A.; CAVALCANTE, C.A.V. Some Insights Into the Effect of Maintenance Quality for a Protection System. *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 64, No. 2: 661-672, 2015.
- CAVALCANTE, C.A.V.; SCARF, P.A.; DE ALMEIDA, A.T. A study of a two-phase inspection policy for a preparedness system with a defective state and heterogeneous lifetime. *Reliability Engineering and System Safety*, 96: 627-635, 2011.
- CAVALCANTE, C.A.V.; LOPES, R.S.; SCARF, P.A. A general inspection and opportunistic replacement policy for one-component systems of variable quality. *European Journal of Operational Research*, 266(3): 911-919, 2018.
- CHRISTER, A.H.; WALLER, W.M. Delay Time Models of Industrial Inspection Maintenance Problems. *The Journal of the Operational Research Society*, 35(5): 401-406, 1984.
- CHRISTER, A.H., WHITELAW, J. An Operational Research Approach to Breakdown Maintenance: Problem Recognition, *The Journal of the Operational Research Society*, 34:11: 1041-1052, 1983.
- COX, L.A. *Risk Analysis of Complex and Uncertain Systems*. s.l. Springer, 2009, 436p.
- CREACO, E.; FRANCHINI, M.; ALVISI, S. Optimal Placement of Isolation Valves in Water Distribution Systems Based on Valve Cost and Weighted Average Demand Shortfall. *Water Resources Management*, 24:4317-4338, 2010.

DE ALMEIDA, A.T. Modelagem multicritério para seleção de intervalos de manutenção preventiva baseada na teoria da utilidade multiatributo. *Pesquisa Operacional*, 25(1): 69-81, 2005.

DE ALMEIDA, A.T. Multicriteria Model for Selection of Preventive Maintenance Intervals. *Quality and Reliability Engineering International*, 28: 585-593, 2012.

DE ALMEIDA, A.T. *Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério*. São Paulo, Atlas, 2013, 231 p.

DE ALMEIDA, A.T.; ALENCAR, M.H.; GARCEZ, T.V.; FERREIRA, R.J. A systematic literature review of multicriteria and multi-objective models applied in risk management. *IMA Journal of Management Mathematics*, 00: 1-32, 2016.

DE ALMEIDA, A.T.; DE ALMEIDA, J.A., COSTA, A.P.C.S.; DE ALMEIDA-FILHO, A.T. A new method for elicitation of criteria weights in additive models: Flexible and interactive tradeoff. *European Journal of Operational Research*, 000: 1-13, 2015.

DE ALMEIDA, A.T.; CAVALCANTE, C.A.V.; ALENCAR, M.H.; FERREIRA, R.J.P.; DE ALMEIDA-FILHO, A.T., GARCEZ, T.V. *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*. s.l., Springer, 2015, 417p.

DE ALMEIDA, A.T.; FERREIRA, R.J.P.; CAVALCANTE, C.A.V. A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability. *IMA Journal of Management Mathematics*, 00: 1-23, 2015.

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

DING, S.H.; KAMARUDDIN, S. Maintenance policy optimization - literature review and directions, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76:1263-1283, 2015.

DOANE, D.P.; SEWARD, L.E. *Estatística aplicada à administração e economia*. 4.ed. Porto Alegre, McGraw Hill, 2014, 826p.

FITOUHI, M. C.; NOURELFATH, M.; GERSHWIN, S. B. (2017). Performance evaluation of a two-machine line with a finite buffer and condition-based maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 166: 61-72, 2017.

FONTANA, M.E.; MORAIS, D.C. Modelo para setorizar redes de distribuição de água baseado nas características das unidades consumidoras. *Produção (São Paulo)*, 25(1): 143-156, 2015.

GIUSTOLISI, O.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. Extended Period Simulation Analysis Considering Valve Shutdowns. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134: 527-537, 2008.

GIUSTOLISI, O.; SAVIC, D. Identification of segments and optimal isolation valve system design in water distribution networks. *Urban Water Journal*, 7:1: 1-15, 2010.

GOULTER, C.; COALS, A.V. Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks, *Journal of Transportation Engineering*, 122(3): 287-301, 1986.

HELLER, L.; PÁDUA, V.L. *Abastecimento de água para consumo humano*. Belo Horizonte, editora UFMG, 2006, 859 p.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. *Introdução à Pesquisa Operacional*. 8ª ed., São Paulo, McGraw-Hill, 2006, 828p.

JIA, X.; CHRISTER, A.H. A periodic testing model for a preparedness system with a defective state. *IMA Journal of Management Mathematics*, 13: 39-49, 2002.

JUN, H.; LOGANATHAN, G.V.; DEB, A.K.; GRAYMAN, W., SNYDER, J. Valve Distribution and Impact Analysis in Water Distribution Systems. *Journal of Environmental Engineering*, 133: 790-799, 2007.

JUN, H.; LOGANATHAN, G.V.; KIM, J.H.; PARK, S. Identifying Pipes and Valves of High Importance for Efficient Operation and Maintenance of Water Distribution Systems. *Water Resources Management*, 22: 719-736, 2008.

KEENEY, R. L. RAIFFA, H. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. New York, John Wiley & Sons, 1976, 569 p.

KIM, J.H.; MAYS, L.W. Optimal rehabilitation model for water-distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120: 674-692, 1994.

KLEINER, Y.; ADAMS, B.J.; ROGERS, J.S. Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation. *Water Resources Research*, 34(8): 2039-2051, 1998.

LIU, H.; WALSKI, T.; FU, G.; ZHANG, C. Failure Impact Analysis of Isolation Valves in a Water Distribution Network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(7): 04017019:1-10, 2017.

LOUCKS, D.P. Managing Water as a Critical Component of a Changing World. *Water Resources Management*, 31: 2905-2916, 2017.

MARCONI, M.A.; LAKATOS, E.A. *Técnicas de Pesquisa*. São Paulo, Editora Atlas S. A., 1985, 282p.

MARLOW, D.R.; BEALE, D.J.; MASHFORT, J.S. Risk-based prioritization and its application to inspection of valves in the water sector. *Reliability Engineering and System Safety*, 100: 67-74, 2012.

MÁRQUEZ, A.C. *The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance*. s.l., Springer, 2007, 333p.

MÁRQUEZ, A.C.; LEÓN, P.M.; FERNÁNDEZ, J.F.G. The maintenance management framework: A practical view to maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 15(2): 167-178, 2009.

MARTINS, R. A. Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: MIGUEL, P. A. C. (coord) *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações*. Rio de Janeiro, Elsevier, 2012. cap. 3, p. 47-63.

MAYS, L.W. (organizador). *Water distribution systems handbook*. s.l., McGraw-Hill, 2000.

MAZZUCHI, T.A.; VAN DORP, J.R. A Bayesian expert judgement model to determine lifetime distributions for maintenance optimization. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(4): 307-315, 2012.

MONTE, M.B.S.; DE ALMEIDA-FILHO, A.T. A Multicriteria Approach Using MAUT to Assist the Maintenance of a Water Supply System Located in a Low-Income Community. *Water Resources Management*, 30(9): 3093-3106, 2016.

NAKAGAWA, T. *Maintenance Theory of Reliability*. s.l., Springer, 2005, 269p.

PHAM, H.; WANG, H. Imperfect Maintenance. *European Journal of Operation Research*, 94: 425-438, 1996.

ROY, B. *Multicriteria Methodology for decision Aiding*. s.l., Kluwer Academic Publishers, 1996, 292.

SCARF, P.A.; CAVALCANTE, C.A.V. Modelling quality in replacement and inspection maintenance. *International Journal of Production Economics*, 135: 372-381, 2012.

SCARF, P.A.; CAVALCANTE, C.A.V.; DWIGHT, R.A.; GORDON, P. An Age-Based Inspection and Replacement Policy. *IEEE Transactions on Reliability*, 58(4): 641-648, 2009.

SOUSA, D.C.F.; LOPES, R.S.; GARCEZ, T.V. Princípios de redução de risco na modelagem de substituição em grupo sob o enfoque da teoria da utilidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 49, Blumenau, 2017.

TIJMS, H. C. *A First Course in Stochastic Models*. s.l., John Wiley & Sons Ltd, 2003, 478p.

TROJAN, F.; MORAIS, D.C. Maintenance Management Decision Model for Reduction of Losses in Water Distribution Networks. *Water Resources Management*, 29: 3459-3479, 2015.

TURBAN, E. (1967). The Use of Mathematical Models in Plant Maintenance Decision Making, *Management Science*, 13(6):B-342-B-358.

VAN HORENBEEK, A.; PINTELON, L.; MUCHIRI, P. Maintenance optimization models and criteria. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1(3):189-200, 2010.

VAURIO, J.K. Unavailability analysis of periodically tested standby components. *IEEE Transactions on Reliability*, 44(3): 512-517, 1995.

VAURIO, J.K. Availability and cost functions for periodically inspected preventively maintained units. *Reliability Engineering and System Safety*, 63: 133-140, 1999.

VINCKE, P. *Multicriteria decision-aid*. John Wiley & Sons Ltd, 1992.

WALSKI, T.M. Water distribution valve topology for reliability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 42: 21-27, 1993.

WANG, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139: 469-489, 2002.

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

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