



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

AUGUSTO JOSÉ DA SILVA RODRIGUES

**MODELO MULTICRITÉRIO BASEADO NO MÉTODO FITRADEOFF PARA
DEFINIÇÃO DE TEMPOS DE INSPEÇÃO EM UM SISTEMA SUJEITO A
INSPEÇÕES IMPERFEITAS**

Recife

2020

AUGUSTO JOSÉ DA SILVA RODRIGUES

**MODELO MULTICRITÉRIO BASEADO NO MÉTODO FITRADEOFF PARA
DEFINIÇÃO DE TEMPOS DE INSPEÇÃO EM UM SISTEMA SUJEITO A
INSPEÇÕES IMPERFEITAS**

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
2020

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- R696m Rodrigues, Augusto José da Silva.
 Modelo multicritério baseado no método fitradeoff para definição de tempos de inspeção em um sistema sujeito a inspeções imperfeitas / Augusto José da Silva Rodrigues – Recife, 2020.
 73 f.: figs., gráfs., tabs., abrev. e siglas.
- Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, 2020.
 Inclui referências.
1. Engenharia de Produção. 2. Delay time. 3. FITradeoff. 4. Inspeções imperfeitas. 5. Política de manutenção. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virgínio (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG / 2020-88



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

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

AUGUSTO JOSÉ DA SILVA RODRIGUES

***“MODELO MULTICRITÉRIO BASEADO NO MÉTODO FITRADEOFF PARA
DEFINIÇÃO DE TEMPOS DE INSPEÇÃO EM UM SISTEMA SUJEITO A
INSPEÇÕES IMPERFEITAS”***

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato **AUGUSTO JOSÉ DA SILVA RODRIGUES, APROVADO.**

Recife, 19 de fevereiro de 2020.

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

Prof^a. Dra. Caroline Maria de Miranda Mota (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof^a. Dra. Mischel Carmen Neyra Belderrain (Examinadora Externa)
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

Dedico este trabalho à minha mãe, Ilza Rodrigues, pelo amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o referencial absoluto do universo, por sempre direcionar os meus passos, dando-me saúde, sabedoria e discernimento para optar pelas decisões corretas.

À minha família, em especial à minha mãe Ilza Rodrigues, pela educação, incentivo e amor.

Ao meu orientador Cristiano Cavalcante, por todo suporte necessário. Agradeço por sua dedicação, sua paciência e, principalmente, pelo seu carisma. A sua forma de liderar me inspira e me motiva a dar o meu melhor diariamente.

À minha namorada Isabela Araújo, pelo companheirismo, pela paciência e por acreditar em mim.

Não poderia deixar de agradecer aos laboratórios pelos quais convivi. Ao CDSID, pelos conhecimentos de programação, ao GPSID, pela oportunidade de participar do projeto de manutenção, e ao RANDOM, laboratório no qual sou colaborador, pelo fantástico ambiente de convivência e por todas as ótimas amizades ali construídas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP/UFPE) que tive a oportunidade de ser aluno, pelos conhecimentos a mim concedidos, que contribuíram para minha evolução profissional e pessoal.

As professoras da banca avaliadora, Caroline Mota e Mischel Carmen, pelas valiosas sugestões para este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro prestado durante todo o período do mestrado, permitindo assim o desenvolvimento desta dissertação.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma forma para a finalização de mais um ciclo da minha vida.

“The difference between what we do and what we are capable of doing would suffice to solve most of the world's problems”.

Mahatma Gandhi

RESUMO

A presente pesquisa apresenta um modelo multicritério para o estabelecimento de uma política de manutenção, operacionalizada em termos de atividades de inspeção, voltada para um sistema de proteção (válvula de bloqueio). Sua grande motivação deriva do fato da demanda por gás natural estar passando por um amplo crescimento, promovendo cada vez mais a utilização e construção de novos gasodutos. Como a procura por esse combustível envolve diversas organizações, variando de grandes indústrias a condomínios residenciais, uma parcela razoável de linhas de dutos está inserida em áreas habitadas ou com possibilidade de habitação, aumentando ainda mais os riscos de acidentes e incrementando as possibilidades de se tornar um desastre. Com isso, uma correta política de manutenção assume um papel estratégico para a empresa responsável, sendo necessário um embasamento matemático e científico, baseados nos fatos realísticos, para a correta tomada de decisão. Neste sentido, este trabalho propõe um novo modelo de inspeção baseado no *delay time* e sob uma perspectiva multicritério, onde não apenas o custo das inspeções é modelado, como também o tempo de inatividade (*downtime*) das válvulas e o número de equipes dedicadas a manutenibilidade, que são fatores críticos atrelados as atividades de manutenção nos gasodutos. Dentre as principais contribuições desta dissertação, destacam-se: o desenvolvimento do modelo para válvulas de gasodutos sujeito a inspeções imperfeitas (falso negativos) e a aplicação do método multicritério FITradeoff para tratar os conflitos entre os critérios de avaliação, considerando uma problemática de ordenação, chegando então a melhor política de manutenção a ser adotada, de acordo com as preferências do decisor.

Palavras-chave: *Delay time*. FITradeoff. Inspeções imperfeitas. Política de manutenção.

ABSTRACT

This research presents a multicriteria model for the establishment of a maintenance policy, operationalized in terms of inspection activities, focused on a protection system (shutoff valve). Its great motivation derives from the fact that the demand for natural gas has been undergoing a large growth, increasingly promoting the use and construction of new pipelines. As demand for this fuel involves many organizations, from large industries to residential condominiums, a reasonable portion of pipeline lines are in inhabited areas or in places with possibility of housing, further increasing risks of accidents and the chances of becoming a disaster. Thus, a correct maintenance policy assumes a strategic role for the responsible company, showing the necessity of a mathematical and scientific study, based on real facts, for the correct decision making. In this sense, this work proposes a new inspection model based on the delay time and in terms of a multicriteria perspective, where not only the cost of inspections is modeled, but also valves downtime and the number of teams dedicated to maintainability, which are critical factors linked to pipeline maintenance activities. Among the main contributions of this dissertation, one may highlight: the model development for pipeline valves subject to imperfect inspections (false negatives) and the application of the FITradeoff multicriteria method to deal with conflicts between criteria evaluation, considering the ranking problematic, according to the preferences of the decision maker.

Keywords: Delay time. FITradeoff. Imperfect Inspections. Maintenance Policy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O conceito Delay Time	32
Figura 2 - Inspeção no intervalo iT: ocorrência de uma falha.....	33
Figura 3 - Inspeção no intervalo iT: antecipação da falha.....	34
Figura 4 - Procedimento para resolução de um problema de decisão	38
Figura 5 - Funcionamento do SAD do FITradeoff para problemática de ordenação	40
Figura 6 - Representação da variável de decisão do modelo.....	45
Figura 7 - Representação da renovação do componente após a identificação de um defeito (O).....	46
Figura 8 - Representação da renovação do componente após o surgimento de uma falha (●), que foi ocasionada pela presença de um defeito (O) em um momento anterior	47
Figura 9 - Representação da renovação do componente em uma falha (●), após um falso negativo que não identificou o defeito (O) durante a inspeção iT	48
Figura 10 - Válvula de bloqueio	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Comportamento da função “custo” para o conjunto de alternativas.....	56
Gráfico 2 - Comportamento da função “downtime” para o conjunto de alternativas	56
Gráfico 3 - Comportamento da função “número de pessoas na equipe” para o conjunto de alternativas	57
Gráfico 4 - Sensibilidade da função $C(T)$ quando β varia.....	60
Gráfico 5 - Sensibilidade da função $W(T)$ quando β varia.....	60
Gráfico 6 - Sensibilidade da função $Y(T)$ quando β varia.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da Pesquisa	18
Tabela 2 - Gerações da Manutenção.....	24
Tabela 3 - Matriz de Decisão.....	36
Tabela 4 - Parâmetros associados às distribuições	53
Tabela 5 - Custos associados às ações de manutenção.....	54
Tabela 6 - Número de membros em cada equipe de manutenção	54
Tabela 7 - Parâmetros de Input.....	54
Tabela 8 - Alternativas de decisão.....	54
Tabela 9 - Matriz consequências	55
Tabela 10 - Ordenação das alternativas	58
Tabela 11 - Constantes de escala.....	59
Tabela 12 - Análise de sensibilidade	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CDF	Função de Distribuição Acumulada;
CPS	<i>Cyber-Physical System</i> ;
DTM	<i>Delay Time Model</i> ;
FITradeoff	<i>Flexible and Interactive Tradeoff</i> ;
IoT	Internet das Coisas;
MBC	Manutenção Baseada em Condições / Manutenção Preditiva;
MC	Manutenção Corretiva;
MCDA	<i>Multi-Criteria Decision Aiding</i> ou <i>Multi-Criteria Decision Analysis</i> ;
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i> ;
MP	Manutenção Preventiva;
MTBF	Período Médio Entre Falhas;
PDF	Função de Distribuição de Densidade ou Probabilidade;
SAD	Sistema de Apoio à Decisão.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Descrição do Problema.....	15
1.2	Justificativa e Relevância.....	16
1.3	Objetivos.....	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
1.4	Metodologia.....	18
1.5	Estrutura do Trabalho	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1	Manutenção.....	22
2.1.1	Definição e Finalidades	22
2.1.2	Histórico da Manutenção.....	23
2.1.3	Classificação da Manutenção	26
2.1.3.1	<i>Manutenção Corretiva.....</i>	<i>26</i>
2.1.3.2	<i>Manutenção Preventiva.....</i>	<i>27</i>
2.1.3.3	<i>Manutenção Preditiva</i>	<i>27</i>
2.2	Particularidades da Manutenção em Sistemas de Prestação de Serviços	28
2.3	Planejamento da Manutenção em Gasodutos.....	29
2.4	Modelo Delay Time.....	31
2.4.1	Delay Time para Sistemas de Componente Único	32
2.5	Decisão Multicritério.....	35
2.5.1	Método FITradeoff	39
3	MODELO DE INSPEÇÃO MULTICRITERIAL PARA GASODUTOS	42
3.1	Modelo Multicritério para Definição de Tempos de Inspeção	42
3.2	Estruturação do Modelo Proposto	43
4	ESTUDO NUMÉRICO	52
4.1	Aplicação do Modelo	52
4.2	Análise de Sensibilidade.....	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
5.1	Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Antigamente, a manutenção era considerada um mal necessário à organização, aparecendo dentro das empresas como mais um componente de despesas totais. Como consequência das transformações nesse setor, a função manutenção também evoluiu, levando a alta administração a reconhecer que ter uma estratégia de manutenção bem pensada, juntamente com uma implementação cuidadosa, pode realmente ter um impacto financeiro significativo (PINTELON; PARODI-HERZ, 2008).

Hoje, é perceptível que boas estratégias de manutenção desempenham um papel importante na eficácia dos processos industriais, evitando ações desnecessárias ou ineficazes nas organizações, através da agregação de atividades que contribuem efetivamente para a disponibilidade dos equipamentos, para a redução dos custos das empresas e para a atenuação dos impactos ambientais. Singh, Kumar e Naikan (2019), por exemplo, destacam o quão drástico para a sustentabilidade pode ser a falha em um motor de indução, que pode aumentar não apenas o consumo de energia, mas a quantidade de CO₂ emitido na atmosfera.

Consequentemente, devido as vantagens supracitadas, houve um crescimento na literatura sobre otimização de manutenção, através de diversas publicações sobre técnicas e modelos matemáticos, que, segundo Driessen, Peng e Van Houtum (2017), são normalmente usados para apoiar certos objetivos, estabelecendo as melhores políticas de manutenção. Por sua vez, esses objetivos podem variar, conforme as prioridades competitivas da empresa.

Tais aplicações sobre as políticas de manutenção são diversas. Alguns trabalhos tratam a possibilidade de que as inspeções possam ser imperfeitas (BERRADE; SCARF; CAVALCANTE, 2015; BERRADE; SCARF; CAVALCANTE, 2017). Flage (2014), considerada o cenário de que as próprias inspeções induzam falhas. Berrade, Scarf e Cavalcante (2018) avaliam algumas circunstâncias em que a falha de um dispositivo se dá influenciada por um defeito induzido por outro dispositivo. Mais recentemente, Yang *et al.* (2019) investigaram uma política de manutenção preventiva para um sistema de componente único, considerando não apenas reparo imperfeito, mais também substituição adiada.

Dentro dessa conjuntura, nos últimos anos foi dada uma atenção significativa a ações que minimizem impactos negativos ocasionados por falhas em gasodutos de distribuição de gás natural, muitas vezes considerando redução de custos através de melhores políticas de manutenção (ZHANG; ZHOU, 2014; LIU *et al.*, 2018; BAHOOTOROODY *et al.*, 2019). De

fato, é nítido que falhas nesses tipos de sistemas podem causar consequências críticas para a sociedade e o meio ambiente, além de enormes perdas econômicas.

À luz dessas discussões, tendo em vista que tubulações são infraestruturas vitais para a transmissão de grandes quantidades de gás natural, esse estudo propõe uma política de manutenção para trechos de gasodutos, mais especificamente aplicada no contexto de inspeções de válvulas de bloqueio inseridas nos dutos, fundamentado no pressuposto de que uma correta política de manutenção assume um papel estratégico e valioso para as empresas.

1.1 Descrição do Problema

Os gasodutos são sistemas de tubulações formados por vários componentes que precisam estar sempre disponíveis e funcionando em perfeito estado. Quando um gasoduto é instalado em uma região, um perigo é introduzido e na maioria das vezes os cidadãos das áreas periféricas vivem diariamente com o mínimo de conhecimento sobre os perigos (ZHAO; HAN; LUO, 2018). Em outras ocasiões, gera-se riscos que são aceitos pela sociedade devido aos benefícios que podem ser proporcionados pela instalação desses gasodutos, bem como a garantia do controle desses riscos.

Em consonância com o aumento de sistemas de tubulações, ocorreram numerosos acidentes com gás natural. Em 2004, o vazamento de gás natural levou a uma explosão em um distrito da cidade de Luzhou, na China, causando 5 mortes e 35 ferimentos graves. No mesmo ano, na província de Shenyang, cidade de Liaoning, também testemunhou uma grande falha de energia devido a vazamentos de gás natural e incêndios subsequentes, que afetaram a produção e a vida dos residentes locais (MA; CHENG; LI, 2013). Em 2009, uma explosão causada por vazamento de gás induziu a maior conflagração em Moscou (Rússia) desde a Segunda Guerra Mundial (HAN; WENG, 2011).

Diante do exposto, frisa-se que, ações de manutenção precisam ser adequadamente estabelecidas e operacionalizadas para assegurar não só o máximo de segurança contra possíveis falhas em gasodutos, mas principalmente a prontidão dos equipamentos de proteção, permitindo que esses operem perfeitamente quando as falhas acontecerem. Muitas vezes, conforme o caso de estudo de Zhao e Song (2016), gasodutos operam por longos anos sem inspeções periódicas, possibilitando que os defeitos se propaguem e a falha surja.

Vale salientar que, apesar dos recentes avanços sobre políticas de manutenção, muitos dos modelos de manutenção buscam estabelecer ações que otimizem apenas um critério, como

custo (WANG, 2013) ou *downtime* (NAZEMI; SHAHANAGHI, 2015). Ferreira, De Almeida e Cavalcante (2009) enaltecem a importância dos modelos permitirem que o tomador de decisão observe simultaneamente mais de um aspecto. Nesse princípio, este trabalho busca agregar essa contribuição sob uma perspectiva multicritério.

Por fim, há uma carência de considerar nos modelos matemáticos de manutenção a possibilidade de ocorrer erros de julgamento, como os falsos negativos. Berrade, Scarf e Cavalcante (2013) detalham que existe uma presença de um falso negativo quando durante uma inspeção não é identificado que o componente está falho, ocorrendo um erro de afirmação por parte do mantenedor.

1.2 Justificativa e Relevância

É fundamental que as empresas busquem adotar otimização de políticas de manutenção, já que, em particular o planejamento de atividades de manutenção, possui grande relevância a partir do momento que ajuda os gerentes a monitorarem as condições dos ativos e a entenderem os aspectos financeiros associados aos custos de manutenção (WU; COOLEN; LIU, 2017).

À título de exemplificação, nos processos de transformação das indústrias, por exemplo, mais de um quarto da força total de trabalho lida com manutenção (De Jonge, Dijkstra e Romeijnnders (2015)) e, especificamente em indústrias que envolvem processos químicos, em torno de 30%, o que contribui para que as implicações financeiras advindas da mão de obra sejam substanciais (Waeyenbergh e Pintelon (2002)), justificando ainda mais a necessidade da adoção de metodologias para redução de custos empresariais no setor de manutenção.

Em outro aspecto, este trabalho busca demonstrar a importância da concentração de atividades de manutenção nas válvulas (equipamentos de proteção). Justifica-se tal ponto devido a dificuldade dos mantenedores inspecionarem trechos de gasodutos que, na maioria dos casos, está em subsolo ou em áreas de difícil acesso, onde atividades de inspeção ou mesmo monitoramento, se tornam bastante difíceis ou tecnologicamente inviáveis, como também, devido a maioria das causas de acidentes serem provenientes de fatores externos, ou seja, por terceiros, torna-se bastante importante a observação desses equipamentos.

Além disso, muitas políticas de manutenção consideram que as inspeções são perfeitas (FERREIRA; DE ALMEIDA; CAVALCANTE, 2009; SCARF *et al.*, 2009). No entanto, em muitas situações realistas, o estado de um componente pode ser totalmente desconhecido ou submetido a muitos erros de julgamento. Assim, de forma a aproximar o desenvolvimento do

modelo matemático com a realidade, esta pesquisa leva em consideração no modelo analítico a probabilidade de ocorrer falsos negativos durante as inspeções. Para Cavalcante, Scarf e Berrade (2019), essa premissa é expressa quando o verdadeiro estado funcional do sistema não pode ser conhecido com certeza, determinando que a eficácia da inspeção é suspeita e podem existir momentos em que não é ideal realizar inspeção, pois ela não é economicamente justificada.

Por fim, conforme apontam Da Silva e Lopes (2018), um ponto de vista observado na literatura é que, para determinar tempos de inspeção, geralmente apenas um critério de decisão é analisado. Desse modo, busca-se adotar uma política de inspeção que tenha seus objetivos consolidados em múltiplos critérios, o que permite analisar os conflitos existentes entre os mesmos. Para auxiliar a abordagem multicritério, adota-se o método *Flexible and Interactive Tradeoff* (FITradeoff), proposto por De Almeida *et al.* (2016), permitindo não apenas diagnosticar os benefícios do uso do modelo no trabalho, mas possibilitando verificar a efetividade para uma problemática de ordenação. No que concerne a políticas de manutenção, a literatura é escassa na agregação do método FITradeoff com o modelo *delay time*.

1.3 Objetivos

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é desenvolver um modelo de inspeção considerando inspeções imperfeitas (falso negativo) para válvulas de gasodutos, baseando-se no *delay time* e sob uma perspectiva multicritério, fazendo uso do método FITradeoff para tratar conflitos entre os critérios de avaliação.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Realizar uma revisão bibliográfica acerca dos conceitos fundamentais de manutenção e suas políticas, bem como sobre os métodos *delay time* e FITradeoff;

- Investigar as particularidades da manutenção em sistemas de prestação de serviços e sobre os aspectos relevantes em manutenção de gasodutos;
- Especificar quais são os critérios relevantes para serem modelados;
- Realizar a modelagem matemática incorporando inspeções imperfeitas;
- Construir um modelo multicritério para apoiar a definição da política de manutenção, considerando uma problemática de ordenação;
- Realizar uma aplicação numérica do modelo desenvolvido;
- Verificar a consistência do modelo através de uma análise de sensibilidade.

1.4 Metodologia

Este tópico apresenta a classificação da pesquisa (Tabela 1) conforme a abordagem, os objetivos, os procedimentos técnicos e a natureza. Posteriormente, são detalhadas as etapas fundamentais para o desenvolvimento do trabalho.

Tabela 1 - Classificação da Pesquisa

ABORDAGEM	Quantitativa Qualitativa
OBJETIVOS	Pesquisa exploratória
PROCEDIMENTOS TÉCNICOS	Pesquisa bibliográfica Estudo de caso
NATUREZA	Pesquisa aplicada

Fonte: O Autor (2020).

Quanto à abordagem, este estudo classifica-se em quantitativo e qualitativo. É qualitativo porque dá orientação ao pesquisador para determinar abordagens de análise, coleta de dados e foco de pesquisa, possibilitando a geração de teorias baseadas em descobertas e entendimentos da realidade (SARAÇ, 2011; MILLER, 2015). Complementa-se como quantitativo porque explica o fenômeno por meio de estudos com dados numéricos, que são analisados por métodos matemáticos e são interpretados por meio dos experimentos e pesquisas específicas que se baseia em teorias existentes (MACHONA; CHIKODZI; SITHOLE, 2017; HABES *et al.*, 2018).

Em relação aos objetivos, conceitua-se como pesquisa exploratória, pois a intenção é ganhar uma maior familiaridade com um fenômeno específico ou adquirir novas percepções em novos contextos ou para formular relações mais precisas (SCHOLTEN; DE BLOK; HAAR, 2018).

De acordo com os procedimentos técnicos, o trabalho constitui-se como pesquisa bibliográfica e estudo de caso. A revisão da bibliografia é um passo fundamental para qualquer trabalho científico, pois fornece informações relevantes e às vezes desconhecidas pelo pesquisador. Implica no estudo de artigos, teses, livros e outras publicações normalmente disponíveis em bases de dados indexadas (WAZLAWICK, 2010). Levando em consideração que será verificado a efetividade do modelo através da sua aplicação, o trabalho caracteriza-se também como um estudo de caso, definido por Yin (2017) como um estudo empírico que investiga os fenômenos em seu contexto real.

Por fim, em relação à natureza, a pesquisa classifica-se como aplicada, pois além de ser digerido a solução de problemas específicos, concentra-se em resolver problemas práticos do mundo real (MAHMOUDZADEH; SEYFI, 2017).

No que concerne as etapas fundamentais para desenvolver o trabalho, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica acerca das evoluções dos conceitos fundamentais de manutenção, bem como sobre o método *delay time* e o FITradeoff. Essa etapa da pesquisa foi essencial pelo fato de que, além de adquirir conceitos fundamentais para o estudo, foi possível identificar lacunas na literatura, o que permite um direcionamento melhor do trabalho.

Em sequência, após investigar as particularidades da manutenção em sistemas de prestação de serviços e os aspectos relevantes na manutenção de gasodutos, foram especificados os critérios relevantes para serem modelados. Essa etapa permite que, não apenas sejam levados em consideração os objetivos do decisor (representados por critérios), mas que sejam determinados critérios que condizam com a realidade.

Dando continuidade, optou-se por escolher o modelo *delay time* para realizar as modelagens, pelo fato de representar, conforme revisão da literatura, uma ótima ferramenta para modelagem de manutenção. Para resolução no modelo multicritério de apoio à decisão, foi utilizado o FITradeoff. A escolha pelo método justifica-se tanto porque buscou-se estudar o comportamento do modelo mediante uma racionalidade compensatória por parte do decisor, quanto pelos benefícios relatados no tópico 2.5.1 e também porque, de acordo com Roselli, Frej e De Almeida (2018), por ser um método flexível, o mesmo apresenta informações que podem ser visualizadas graficamente – a partir de suas alternativas potencialmente ótimas – e em qualquer parte do processo o decisor pode escolher uma alternativa. Isso agiliza o processo de tomada de decisão.

Posteriormente, foram desenvolvidos modelos matemáticos que incorporem inspeções imperfeitas bem como construído um modelo multicritério que apoie a definição da política de

manutenção. Assim, a partir da construção de uma matriz de consequências mediante os resultados obtidos com as equações modeladas, foi determinado um tempo ideal de inspeção. Por fim, uma análise de sensibilidade é executada para verificar a robustez do modelo.

1.5 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está disposta em cinco seções: introdução, referencial teórico e revisão da literatura, modelo de inspeção multicriterial para gasodutos, estudo numérico e considerações finais.

A introdução apresenta a contextualização do desenvolvimento do trabalho e é detalhada de forma a descrever o problema, enaltecendo tanto a justificativa e a relevância da existência desta pesquisa, quanto abordando a finalidade do estudo através de um objetivo geral e das particularidades presentes nos objetivos específicos. Além disso, detalha a metodologia utilizada, classificando a pesquisa segundo sua abordagem, seus objetivos, seus procedimentos técnicos e sua natureza. Também descreve minuciosamente as etapas do desenvolvimento do trabalho.

O segundo capítulo expõe o referencial teórico e a revisão da literatura, discutindo os principais conceitos chave tratados neste documento, bem como o estado de arte. Inicialmente, apresenta-se a definição e as finalidades da manutenção e, de forma mais específica, o seu histórico desde os tempos em que a mesma era considerada um mal necessário até a seu uso de forma perspicaz nos dias atuais. Posteriormente, discute-se as particularidades da manutenção em sistemas de serviços e a manutenibilidade dentro do contexto de gasodutos. Por fim, são expostos os significados e as contribuições do modelo *delay time* e do método multicritério FITradeoff.

O terceiro capítulo discorre o modelo de inspeção multicriterial para gasodutos, sendo essa a principal contribuição da dissertação. É nesta seção que é desenvolvido o modelo para definição de tempos de inspeção, são salientados os critérios a serem considerados no modelo e destacada a importância de considerar possibilidade de erros de julgamento. Sua validação é expressa através de uma aplicação numérica e da análise de sensibilidade no capítulo quatro.

As considerações finais sobre o trabalho estão expostas no capítulo cinco. Nesta seção discute-se as contribuições do trabalho e a efetividade no que diz respeito ao atingimento dos objetivos específicos e geral. Por fim, ainda neste capítulo, são ressaltadas não apenas as

limitações ocorridas durante o desenvolvimento da pesquisa, mas aproveita-se a oportunidade para sugerir tópicos a serem trabalhados em estudos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo apresentar o referencial teórico e a revisão da literatura. Inicialmente, aborda-se a conceituação, as finalidades e outros aspectos relacionados com a manutenção de forma geral e, em seguida, trata-se de forma mais específica sobre o modelo *delay time* e o sobre decisão multicritério, destacando o método FITradeoff.

2.1 Manutenção

Esta seção aborda alguns aspectos da manutenção, sendo eles: definição, finalidades, histórico e classificação.

2.1.1 Definição e Finalidades

De forma geral, manutenção é definida como um conjunto de ações técnicas que permitem manter ou restaurar a funcionalidade de um ativo (SHIN; JUN, 2015). Complementarmente, Mostafa, Dumrak e Soltan (2015) detalham que a manutenção pode ser definida mediante seis principais atividades:

- Inspeção: verificar conformidades, observando e avaliando ativos;
- Monitoramento: atividades manuais ou automáticas realizadas para observar o estado real de um ativo;
- Manutenção de rotina: atividades que normalmente não requerem qualificação especial, autorização ou ferramentas especiais, para uma lubrificação, por exemplo;
- Revisão: um conjunto abrangente de exames e ações realizadas para manter o nível exigido de disponibilidade e segurança do ativo, realizada em intervalos de tempo prescritos ou um certo número de operações;
- Reconstrução: ação após o desmantelamento do equipamento e a reparação ou substituição dos componentes que se aproximam do fim da sua vida útil. O objetivo é fornecer ao equipamento uma vida útil que pode ser maior do que a vida útil do equipamento original;
- Reparo: ação física realizada para restaurar a função exigida do equipamento defeituoso.

Como uma visão holística, Sari *et al.* (2015) abordam a sustentabilidade como algo intrínseco a manutenção, carecendo que as empresas alinhem seus objetivos estratégicos e suas

iniciativas sustentáveis, uma vez que o gerenciamento da manutenção sustentável também garante condições aceitáveis para os ativos, reduzindo impactos ambientais, preocupando-se com a segurança dos funcionários e principalmente, garantindo economia financeira.

Concomitante, é importante frisar que as principais finalidades da manutenção são: garantir a funcionalidade da planta (disponibilidade, confiabilidade, qualidade dos produtos, etc.); garantir a segurança das instalações e do meio ambiente; assegurar a rentabilidade na manutenção e uso efetivo dos recursos (energia e matérias-primas) (JASIULEWICZ-KACZMAREK, 2016; YLIPÄÄ *et al.*, 2017).

Dado o supracitado, é notório que os objetivos da manutenção estão altamente relacionados ao contexto de negócios, estratégias, processos e sistemas específicos das empresas. Por esses motivos, todas as unidades organizacionais devem buscar políticas que otimizem seus processos a níveis satisfatórios de produtividade, a fim de permanecerem competitivas no mercado (GONÇALVES; DIAS; MACHADO, 2015).

Portanto, diante dessas diretrizes, fica evidente a importância da manutenção para qualquer sistema de produção, seja ele de bens, onde uma política adequada pode restaurar as condições necessárias do ativo e/ou mantê-lo operando em condições aceitáveis e eficazes, ou um sistema de serviços, em especial, onde as consequências das falhas são mensuráveis não apenas em termos de custo, mas na perda de uma boa imagem para organização e na existência de aversão dos operários a certas práticas, por exemplo.

Desse modo, o estabelecimento de políticas de manutenção concerne tanto aos processos que produzem bens quanto aos processos que produzem serviços, dado que cada um tem características diferentes no tocante ao julgamento da qualidade pelo cliente e a interação dos mesmos com os processos de produção, bem como nas variadas necessidades das organizações. Salienta-se que, o entendimento do conceito de manutenção não deve estar atrelado apenas a prevenção de falhas, mas também as potencialidades que essa prática traz em várias vertentes, já aludidas neste tópico.

2.1.2 Histórico da Manutenção

Pintelon e Parodi-Herz (2008) destacam a evolução da manutenção em quatro momentos: em meados de 1940, a manutenção era considerada uma parte inevitável da produção ou um mal necessário; aproximadamente 20 anos depois (1960), a otimização da manutenção começou a ser levada em consideração; por volta de 1980, a manutenção tornou-

se uma função completa, em vez de uma parte da função produção. Por fim, após o ano de 2000, a manutenção tornou-se parceira das estratégias de negócios.

De maneira análoga, Moubray (1997) detalha esse progresso da manutenção em três gerações:

- 1ª geração (1940 – 1950): consertos eram executados apenas após qualquer avaria/falha;
- 2ª geração (1950 – 1970): com o aumento do número de máquinas, as indústrias começaram a praticar manutenção preventiva, levando em consideração que qualquer falha impossibilitaria a produção;
- 3ª geração (a partir de 1970): a mudança começou a ser corriqueira nas indústrias, trazendo novas técnicas. Começou-se a pensar em segurança, qualidade, meio ambiente e disponibilidade dos equipamentos.

Na mesma tentativa de relatar o desenvolvimento da manutenção, a Tabela 2 demonstra uma síntese realizada por Manickam (2012), que colabora com a literatura com uma visão geral sobre as características associadas as três primeiras gerações da manutenção.

Tabela 2 - Gerações da Manutenção

Características	Gerações da Manutenção		
	1ª Geração	2ª Geração	3ª Geração
Período de tempo	Até a Segunda Guerra Mundial	Da Segunda Guerra Mundial até 1980	A partir de 1980
Visão	Mal necessário	Assunto técnico	Colaboradora de lucro
Atitude	Consertar quando quebrar	Eu opero - você conserta	Parcerias externas e internas
Foco	Não há foco	Foco está na operação	O foco está na disponibilidade, qualidade e serviço
Projeto de máquina	Simples	Complexo	Mais complexo
Mecanização	Sem mecanização	Maior mecanização	Crescimento em mecanização e automação
Habilidades de manutenção	Pouca	Média	Muita
Tempo de inatividade	Não altamente considerado	Focado como crescimento da demanda	Maior foco e consideração
Custos de manutenção	Baixo	Ascensão - em relação a outros custos operacionais	Aumento rápido
Tecnologia da Informação	Não há	Extensa, porém com baixa informatização	Alto nível de informatização

Fonte: Adaptado de Manickam (2012, p. 38).

Posteriormente, por volta dos anos 2000, os estudos sobre manutenção ficaram cada vez mais frequentes, já que os profissionais das indústrias e os pesquisadores acadêmicos começaram a perceber os benefícios que boas políticas de manutenção podem trazer. Desse

modo, Dunn (2003) começou a tentar definir as possíveis práticas para a quarta geração da manutenção, que, conforme o autor explicita, provavelmente se concentrarão na redução da probabilidade de falhas, através de uma cultura mais proativa em vez de reativa.

À luz dessas informações, acrescenta-se que, atualmente uma das principais contribuições para a ascensão manutenção é a indústria 4.0. A indústria 4.0 foi anunciada oficialmente em 2013 como uma iniciativa estratégica alemã para assumir um papel pioneiro em indústrias que atualmente estão revolucionando o setor manufatureiro, estando atrelada a estratégias que aliam tecnologia da informação e meios de produção (XU; XU; LI, 2018).

Mediante esse contexto, Ferreira *et al.* (2017) mostram que um dos benefícios da indústria 4.0 na manutenção, é que ela traz consigo *Cyber-Physical System* (CPS), que objetivam colaborar com a confiabilidade e a segurança das máquinas industriais, prevendo o mau funcionamento das máquinas com seus sensores intermitentes. Assim sendo, a era 4.0 oferece formas inteligentes de sistemas de autoaprendizagem, que preveem falhas, fazem diagnósticos e acionam ações de manutenção (KUMAR; GALAR, 2018). Li, Wang e Wang (2017) introduzem esses conceitos com excelência.

Todavia, é importante lembrar que as pessoas são o fator de sucesso para a Indústria 4.0 e atuam como os principais responsáveis dos CPS (FLEISCHMANN *et al.*, 2016). De forma mais específica, os profissionais de manutenção, que devido aos seus trabalhos para assegurarem os recursos de produção e garantirem a disponibilidade, precisam manter equipamentos comandados por *softwares*, conectados à internet, que geram constantemente uma grande quantidade de informações sobre os determinados parâmetros (SPENDLA *et al.*, 2017).

Portanto, torna-se claro que nas últimas décadas a manutenção teve um crescimento agressivo, justificado pela forma estratégica que as empresas a utilizam atualmente. Além disso, a inclusão de tecnologias como internet das coisas - *IoT* (Der Mauer *et al.*, 2019), realidade aumentada (Scurati *et al.*, 2018) e *big data* (Dinis, Barbosa-Póvoa e Teixeira, 2019), facilitam a identificação do real estado das máquinas e avarias ocultas que poderiam interromper processos de produção e gerar custos adversos. De fato, o uso de tecnologias como essas para prevenir falhas de componentes mostram uma gestão da manutenção cada vez mais perspicaz, que busca garantir tanto a disponibilidade dos ativos, quanto a maximização da produção.

2.1.3 Classificação da Manutenção

Atualmente, existem diversas classificações para a manutenção, e, apesar de algumas ocasionalmente possuírem nomenclaturas distintas, possuem abordagens com essências que convergem para um mesmo princípio. Entretanto, em alguns momentos da literatura, encontram-se divergências na quantificação dos grupos de manutenção, que eventualmente podem ser divididos em dois (Lee e Cha (2016)), três (Cavalcante e Lopes (2015)), quatro (De Faria Jr., Costa e Olivas (2015)) ou mais categorias. Sendo assim, para evitar discrepâncias, este trabalho classifica a manutenção em três categorias: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

2.1.3.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva (MC) busca restaurar as condições originais de um sistema, subsistema ou componente com falha, objetivando recuperar suas condições normais de operacionalidade (ERKOYUNCU *et al.*, 2017). Nessa política, as perdas associadas ao tempo de inatividade são altas, principalmente em indústrias que processam equipamentos com alto valor monetário, já que, conforme Stålhane *et al.* (2016), a falha gera perda da produção, que tende a crescer até que a ação corretiva seja realizada.

No que tange as ações de MC, elas podem variar de reparos ou substituições pequenas, que exigem um tempo de inatividade curto (como a substituição de uma lâmpada ou o ajuste de uma máquina), a grandes reparos, que exigem tanto um *downtime* alto, quanto uma quantidade significativa de recursos (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016).

Assim, apesar de ser uma política antiga, o uso da MC ainda pode ser proveitoso nos dias atuais, uma vez que sejam levados em considerações os custos para o uso da ação corretiva e as consequências que uma falha pode gerar. Ou seja, recomenda-se o uso dessa ação (deixar falhar) dado três princípios: as consequências da falha serem fúteis, não havendo desastres ambientais e nem sociais; o custo da restauração ou substituição do item ser menor do que o custo do uso de ações de manutenção preventiva e; os custos do tempo de inatividade serem banais.

2.1.3.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva (MP), é caracterizada pelo planejamento de um conjunto de atividades e tarefas específicas para manter o equipamento em funcionamento, buscando evitar que ocorram falhas inesperadas que podem causar enormes perdas econômicas e riscos significativos para a segurança pessoal e ambiental (CAVALCANTE; LOPES, 2015; YANG *et al.*, 2018)

Considerada uma evolução da MC, a MP destaca-se por tentar reduzir deteriorações de equipamentos, através de intervenções periódicas programadas e eventualmente parâmetros observados (BOUSDEKIS *et al.*, 2015; DO *et al.*, 2019). Além disso, apesar de em algumas situações possuir as desvantagens de incluir alta intensidade de trabalho e execuções de ações de manutenções desnecessárias, quando utilizada de forma satisfatória, a MP atinge economias de custo entre 12% e 18% em relação a MC (RUPARATHNA; HEWAGE; SADIQ, 2018).

Em geral, utiliza-se manutenção preventiva ou quando se pretende rejuvenescer um componente, o que permite eliminar possíveis falhas que seriam ocasionadas por causa da degradação do item, ou quando objetiva-se restaurá-lo pelo menos para que ele volte a operar executando as funções da forma como foi planejado.

2.1.3.3 Manutenção Preditiva

Por outro lado, na manutenção preditiva (em alguns momentos literários também chamada de manutenção baseada em condições (MBC)), as ações são programadas utilizando uma avaliação das condições do equipamento, que é realizada por instrumentações e perícias especializadas, conduzidas por profissionais adequadamente treinados (CULLUM *et al.*, 2018).

Em outras palavras, o objetivo da manutenção preditiva é reduzir o tempo de inatividade e o custo de manutenção sob a premissa de fabricação com falha zero, monitorando a condição de trabalho do equipamento e prevendo quando a falha do equipamento pode ocorrer, já que a identificação de parâmetros fora do padrão resultam na execução de ações de manutenção antes que ocorra uma falha (LI; WANG; WANG, 2017; MOURTZIS; VLACHOU, 2018).

No que tange as técnicas de MBC, Selcuk (2016) detalha algumas das mais usuais, destacando:

- **Análise de vibração:** É usada principalmente em equipamentos rotativos ou alternativos, seja de forma contínua ou em intervalos programados. Aparelhos específicos detectam

vibrações excessivas e não comuns nos equipamentos, possibilitando a detecção de um defeito antes da falha;

- **Análise de óleo:** Análises físicas e químicas de óleos e lubrificantes usados podem fornecer informações valiosas sobre condições desses fluidos e consequentemente do estado dos componentes;
- **Termografia:** A termografia é desenvolvida explorando o fato de que todos os objetos cuja temperatura é maior que o zero absoluto emitem luz infravermelha (IR) e comprimento de onda da luz, possibilitando verificar condições anormais do equipamento;
- **Análise acústica:** Padrões sonoros são registrados visando identificar padrões anormais, que podem indicar desgaste ou outro tipo de deterioração no componente.

Finalmente, é necessário frisar que o decisor deve determinar qual das manutenções supracitadas é a ideal para o sistema de produção da sua empresa, levando em considerações os custos envolvidos e as consequências de uma falha no seu processo. Como subsídio de apoiar o tomador de decisões, existem diversas políticas de manutenção já desenvolvidas por pesquisadores e profissionais da área, que fazem parte da MC, MP e da MBC.

Dessa maneira, dado a relevância da MP, como contribuição desta pesquisa, o tópico 2.4 aborda as contribuições do modelo *delay time* para construção de políticas de manutenção. Foi dado ênfase a esse modelo por ser a essência que justifica a existência deste trabalho.

2.2 Particularidades da Manutenção em Sistemas de Prestação de Serviços

Os sistemas de transmissão de gás configuram um sistema de provimento de serviço, nesse sentido, algumas características gerais deste tipo de sistema são evidenciadas. A percepção da qualidade, por exemplo, nesse setor, muitas vezes é comprovada junto ao cliente, não no produto a ser comercializado, como acontece na indústria de bens. É comum na prestação de serviços, o consumo do produto imediatamente após produzido e de forma contínua, ou seja, o processo não para e o cliente está sempre consumindo, caso que é encontrado, em particular, na distribuição de gás, onde muitas vezes a estocagem não é praticada. Com isso, o *feedback* do consumidor a respeito da qualidade do serviço é por vezes imediato (SLACK; BRANDON-JONES; JOHNSTON, 2013).

Para o caso do presente trabalho, tal fato é extremamente crítico, pois o produto fornecido é um combustível responsável diretamente por centenas de operações. Logo, sua interrupção é instantaneamente sentida em vários pontos, comprometendo imediatamente a qualidade do serviço.

Posto isso, entende-se melhor a grande importância da manutenção no setor de serviços, pois atividades ineficientes e ineficazes de manutenção estarão sendo percebidas de imediato pelo cliente, através das consequências negativas refletivas na qualidade do serviço. O mesmo ocorre na indústria, porém esta conta com um leque maior de possibilidades para se proteger das falhas, como estoques e retrabalhos.

Outra questão a ser considerada está relacionada aos atores envolvidos no processo. No caso do sistema de serviço, o número de pessoas afetadas pela interrupção pode ser enorme. Além disso, é extremamente difícil para uma organização comercial rastrear a totalidade dos danos causados pela interrupção desse tipo de produto, que é um serviço (DE ALMEIDA *et. al*, 2015). Assim, para sistemas de produção de serviço a falha não é totalmente traduzível em termos monetários. Por esse motivo, é importante se fazer a inserção de outros critérios que possam juntamente com o custo representar melhor as consequências advindas da falha.

2.3 Planejamento da Manutenção em Gasodutos

Muitos autores descrevem que o objetivo da manutenção é garantir a disponibilidade máxima dos sistemas, com o desempenho apropriado e que é esperado, reduzindo custos (ZHENG *et al.*, 2016; CAVALCANTE; LOPES; SCARF, 2018). Segundo Antaki (2003), os ativos físicos que compõe o sistema de gasodutos, são os dutos, válvulas, equipamentos ativos (bombas, compressores, etc.), instrumentação, trocadores de calor, componentes “*in-line*”, a isolamento, suportes, entre vários outros, que podem variar em situações específicas.

Ainda de acordo com Antaki (2003), o planejamento da manutenção para os gasodutos é desenvolvido segundo uma metodologia:

- a) Primeiramente, para qualquer sistema, é determinada a estratégia de manutenção a ser implementada, preventiva, preditiva ou corretiva, pois muitas vezes o custo de se implantar uma manutenção planejada pode superar os custos de correção após as falhas, principalmente para componentes mais simples e menos críticos;
- b) Em seguida, para cada sistema identificado por manutenção preventiva, prepara-se uma lista de componentes (segmentos de dutos, válvulas, bombas, compressores etc.),

detalhando para cada um qual sua função principal, o modo e as causas das falhas, acrescentando também as possíveis consequências;

- c) Para cada causa de falhas em componentes, seleciona-se uma adequada técnica para inspeção, a finalidade é decidir o que é necessário para a inspeção, quando, onde e como;
- d) A próxima etapa deste estudo consiste na escolha de critérios para avaliar os resultados da inspeção, que também está inserido dentro do modelo adotado;
- e) Os passos finais se resumem ao planejamento e a implementação das inspeções, documentação dos resultados e desenvolvimento de recomendações de forma clara, simples e objetiva. Nesse sentido, é com o objetivo de auxiliar processos decisórios na etapa do planejamento, que o modelo multicritério proposto neste trabalho foi desenvolvido.

Apesar de muito bem estruturado o procedimento proposto pelo autor supracitado, em face das consequências que podem advir de um bom ou mau planejamento de manutenção, é imprescindível o uso de modelos que possam dar suporte a decisão no que diz respeito a melhor política a ser adotada. Em termos práticos, é necessário o suporte de um modelo que leve em consideração parâmetros de engenharia de manutenção, como a confiabilidade, o custo de manutenção, bem como, a disponibilidade para se poder propor a frequência ideal de determinada ação (neste caso, a inspeção).

Na literatura, há vários trabalhos que tratam da proposição adequada da atividade de inspeção em sistemas. Contudo, não são muitos os trabalhos que tratam de modelos específicos para sistema de proteção, aqui considerado o foco do estudo. Destaca-se o modelo proposto por Jia e Christer (2002), baseado no modelo *delay time* e que tem como objetivo chegar a um intervalo de tempo ótimo para inspeções, levando em consideração como critério a disponibilidade ótima. O artigo tem contexto um sistema de para-choque hidráulico que reduz o recolhimento no lançamento de mísseis, apesar de uma falha no sistema poder provocar consequências razoáveis, elas estão restritas a possíveis demandas do sistema de lançamento de mísseis, podendo estas jamais ocorrerem.

Chama-se a atenção para o fato de que muitas vezes as consequências podem estar associadas a eventos não tão raros como no caso do exemplo trazido por Jia e Christer (2002), bem como pode ter uma amplitude extraordinariamente negativa. Essas são as características presentes neste trabalho, em que o contexto de aplicação é um sistema de distribuição de gás. De forma mais específica, o modelo proposto é direcionado para o suporte a decisão na

especificação de tempos de inspeção de válvulas de bloqueio, nesse caso, uma vez que ocorra uma falha no gasoduto, a impossibilidade de se isolar o problema por um defeito de uma válvula pode levar a consequências desastrosas, sendo um cenário possível uma explosão de grandes dimensões. Além disso, para os cenários menos críticos, mesmo não havendo explosão ou jato de fogo, só a indisponibilidade do produto, essencial para muitos processos produtivos, pode gerar grandes prejuízos, podendo esses se estender por mais alguns dutos e impactar cada vez mais um número maior de clientes, caso haja falha nas válvulas de bloqueio.

Com base no exposto, fica evidente que os aspectos críticos que devem ser levados em consideração quando se quer definir os tempos entre inspeção nessas válvulas de bloqueio são os custos associados com a frequência de inspeção, bem como a disponibilidade final dessas válvulas. Como será visto posteriormente, os tempos de inspeção que levam a custos mais atrativos de manutenção (mínimo custo), nem sempre têm bons desempenhos no critério disponibilidade (possuem *downtime* alto). Além disso, muitas vezes o número de pessoas dedicadas a manutenção é alto, isso pode fazer com que, por exemplo, não existam pessoas disponíveis para executar uma ação corretiva em um determinado momento, pois elas estão se dedicando a inspeção ou correções de outro componente.

Por esse motivo, reconhece-se o tratamento multicritério como sendo mais apropriado que a otimização de uma única função objetivo, no que diz respeito ao suporte a decisão para a definição de uma política de inspeção mais adequada. Ademais, como visto em Almeida *et al.* (2017), através de uma abordagem multicritério é possível aproveitar ao máximo a análise e exploração de critérios, preferências e *trade-offs*, ajudando os tomadores de decisão a alcançarem um melhor entendimento do problema.

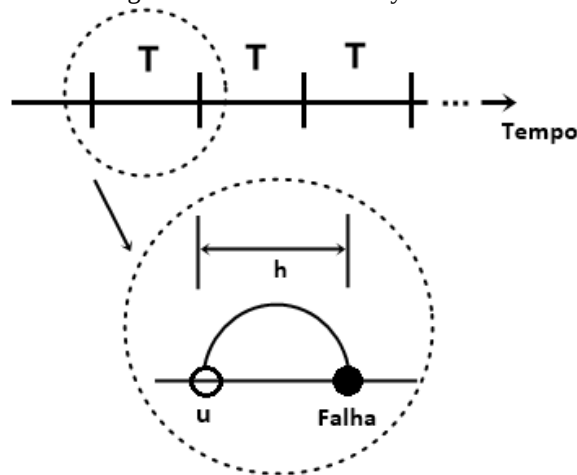
2.4 Modelo Delay Time

O *Delay Time Model (DTM)* foi mencionado por Christer (1976) como uma ferramenta de modelagem de manutenção. A primeira aplicação do modelo ocorreu em outro trabalho de Christer (1982), envolvendo um contexto de manutenção predial, sendo posteriormente expandido para manutenções industriais (CHRISTER; WALLER, 1984a; CHRISTER; WALLER, 1984b).

O DTM visa determinar planejamentos de manutenção através da determinação de intervalos ótimos de inspeção, considerando uma janela de oportunidade a cada intervalo de tempo T , como representado a Figura 1. Para isso, considera-se dois estágios:

- a) Estágio 1: chegada do defeito (u), identificado através de uma inspeção;
- b) Estágio 2: representa o intervalo entre a chegada do defeito até a falha. Esse intervalo é denominado por *Delay Time* (h).

Figura 1 - O conceito Delay Time



Fonte: Adaptado de Wang (2012).

Segundo Wang (2008), para que os intervalos de inspeção ideais possam otimizar uma função critério de interesse, é necessário que seja feita uma modelagem apropriada das durações desses estágios.

Nesse viés, o DTM representa uma janela de oportunidade para que os mantenedores evitem falhas em equipamentos, a partir de alguma ação preventiva. Equipamentos com menor *delay time* precisam de uma vigilância redobrada, já que o prazo necessário para os correspondentes reparos é mínimo.

Ademais, os estudos sobre o DTM estão cada vez mais sendo aplicados em contextos distintos e com algumas modificações na sua estrutura, tanto para multicomponentes (plantas complexas), quanto para um único componente (componente simples). Ressalta-se que, o modelo desenvolvido nesta dissertação é voltado para um componente simples.

2.4.1 Delay Time para Sistemas de Componente Único

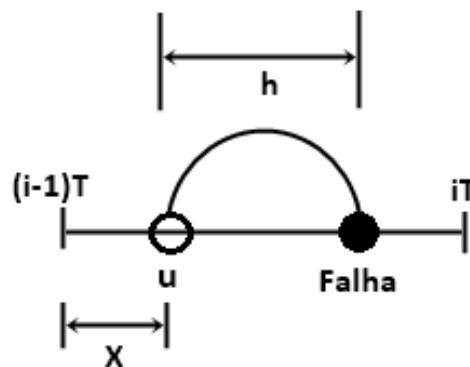
O DTM para componentes simples considerando inspeções perfeitas assume as seguintes notações (CUI, 2002):

- O sistema analisado é um único componente sujeito a uma inspeção perfeita;
- A defeito surge no instante x ;

- As funções de distribuições acumulada (CDF) e de densidade (PDF) de x são conhecidas e denotadas respectivamente por $F_x(x)$ e $f_x(x)$;
- As funções CDF e PDF do *delay time* h também são conhecidas, denotadas por $F_h(h)$ e $f_h(h)$;
- As inspeções são efetuadas regularmente nos intervalos iT , para $i=1,2, \dots$, onde T é a variável de decisão;
- Caso uma falha seja identificada na inspeção, substitui-se o item. Em caso contrário, o item continuará em operação até que uma falha ocorra ou uma inspeção posterior identifica uma falha, considerando que em qualquer uma das situações o componente é renovado e o processo é retomado;
- Os custos relativos à inspeção, a substituição preventiva e a substituição devido à falha são respectivamente, representados por C_i, C_p, C_f ;
- $D(T)$ representa o tempo esperado de *downtime* (tempo de inatividade) do sistema;
- $V(T)$ representa o tempo de vida total esperado do sistema;
- $CE(T)$ representa o custo esperado de manutenção do sistema;
- $C(T)$ é o custo de manutenção do sistema por unidade de tempo;
- PF: Probabilidade de falhar;
- PP: Probabilidade de não falhar.

Dado as notações e considerando que uma inspeção é efetuada em um instante iT , poderão ocorrer duas situações: a ocorrência de uma falha (Figura (2)) e a antecipação da falha (Figura (3)). No segundo caso, a ação preventiva é efetuada antes que ocorra uma falha.

Figura 2 - Inspeção no intervalo iT : ocorrência de uma falha



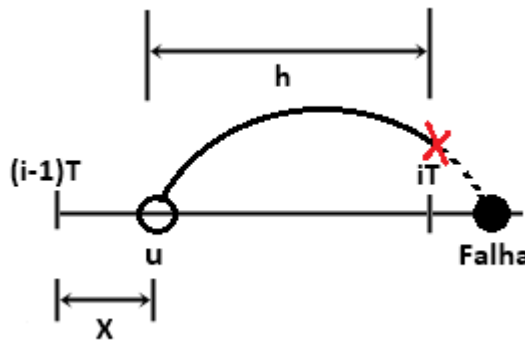
Fonte: Adaptado de Wang (2012).

Analisando a Figura (2), x representa o tempo transcorrido até a identificação do defeito e h o tempo desde a identificação do defeito até a falha (*delay time*), têm-se que $x \in [(i-1)T, iT] \wedge h < iT - x$. Nesse caso, como h foi menor que o tempo restante para a próxima inspeção ($iT - x$) haverá a ocorrência de uma falha, gerando as seguintes consequências:

- Custo: C_f ;
- Vida do componente (comprimento do ciclo): $x + h$.

A segunda situação que pode vir a ocorrer é a antecipação da falha, encenada pela Figura (3).

Figura 3 - Inspeção no intervalo iT : antecipação da falha



Fonte: Adaptado de Wang (2012).

A ocorrência da segunda situação apresenta o caso em que a falha iria ocorrer em um tempo T , mas a inspeção ocorrida em iT preveniu a falha, através de uma ação corretiva. Portanto, dado que $(i-1)T < x < iT \wedge h > iT - x$, conclui-se:

- Custo: C_p ;
- Vida do componente (comprimento do ciclo): iT .

À luz dessas considerações, a probabilidade de falha (PF) e a probabilidade de não haver falha (PP) em um sistema de componente simples é definida como sendo, respectivamente (Equação (1) e (2)):

$$PF = \sum_{i=1}^{\infty} \left[\int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) F_h(iT - x) dx \right] \quad (1)$$

$$PP = \sum_{i=1}^{\infty} \left[\int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) (1 - F_h(iT - x)) dx \right] \quad (2)$$

O custo esperado da manutenção $CE(T)$ será determinado a partir da Equação (3).

$$CE(T) = \sum_{i=1}^{\infty} \{ [(i-1)C_i + C_f] \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) F_h(iT - x) dx + [iC_i + C_p] \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) (1 - F_h(iT - x)) dx \} \quad (3)$$

Também é possível definir a vida $V(T)$, conforme Equação (4):

$$V(T) = \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) \int_0^{iT-x} (x+h) f_h(h) dh dx + iT \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) (1 - F_h(iT - x)) dx \right\} \quad (4)$$

Em seguida, considerando as Equações (3) e (4), o custo esperado da manutenção por unidade de tempo $C(T)$ pode ser dado mediante Equação (5), que representa o cociente do custo esperado da manutenção e da vida total do componente.

$$C(T) = \frac{CE(T)}{V(T)} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \{ [(i-1)C_i + C_f] \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) F_h(iT - x) dx + [iC_i + C_p] \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) (1 - F_h(iT - x)) dx \}}{\sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) \int_0^{iT-x} (x+h) f_h(h) dh dx + iT \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) (1 - F_h(iT - x)) dx \right\}} \quad (5)$$

2.5 Decisão Multicritério

Tomar decisões para solucionar problemas parece ser uma atividade simples e manual ao ser humano, porém pode ser considerada bastante complexa, se envolver possíveis alternativas de ação, diferentes pontos de vista e formas específicas de avaliação, traduzidos como múltiplos critérios que geralmente são envolvidos em conflitos entre si. O que chama a atenção neste tipo de problema é que não existe, normalmente, nenhuma alternativa que seja a melhor, simultaneamente, para todos os critérios.

É da carência de apoiar decisores na resolução desses problemas específicos que os métodos de decisão multicritério surgiram. Em geral, um processo ou problema de decisão no contexto multicritério é denominado por MCDM (*Multi-Criteria Decision Making*) ou MCDA (*Multi-Criteria Decision Aiding* ou *Multi-Criteria Decision Analysis*) (DE ALMEIDA *et al.*, 2015). O MCDM/A é frequentemente empregado com o intuito de ajudar os tomadores de decisão a sintetizarem seus múltiplos objetivos conflitantes (BAUDRY; MACHARIS; VALLEE, 2018).

Nesse contexto, em MCDM/A as preferências do tomador de decisão são consideradas e formalizam axiomas rigorosos que caracterizam o comportamento de um indivíduo através de funções. É exatamente o envolvimento desse personagem uma das características que diferencia o MCDM/A das técnicas clássicas de pesquisa operacional (DE ALMEIDA; GEIGER; MORAIS, 2018).

Posto isso, é válido ressaltar que o MCDM/A é usual em situações em que o decisor possui pelo menos duas alternativas como opções para escolha e múltiplos critérios, além das consequências associadas a cada escolha, conforme exposto na Matriz de Decisão $D_{m \times n}$ (Tabela 3). Por via de regra, De Almeida, Morais e Nurmi (2019) abordam que em cada problema MCDM/A existe um conjunto de possíveis consequências para cada um dos múltiplos objetivos. Então um vetor de consequências ($x = x_1, x_2 \dots x_n$) é considerado, onde x_j é a consequência para o critério j . Logo, para cada alternativa I , uma possível consequência x_{ij} pode ser obtida para o critério j .

Tabela 3 - Matriz de Decisão

A	Critério 1	Critério 2	Critério 3	...	Critério j	...	Critério n
A_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	...	x_{1j}	...	x_{1n}
A_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	...	x_{2j}	...	x_{2n}
...	...	...	...	...		...	
a_i	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	...	x_{ij}	...	x_{in}
...	...	...	...	...	...	...	...
a_m	x_{m1}	x_{m2}	x_{m3}	...	x_{mj}	...	x_{mn}

Fonte: Adaptado de De Almeida, Morais e Nurmi (2019).

De posse das informações supracitadas, existem algumas características que devem ser analisadas para a escolha do método multicritério mais adequado para cada problema, sendo elas (DE ALMEIDA *et. al*, 2015):

- a) A natureza do problema analisado, que é a característica central de todo o processo;
- b) O contexto em que o problema é enfrentado, que inclui questões organizacionais e o tempo disponível para a decisão a ser tomada;
- c) A estrutura de preferências do decisor;
- d) A racionalidade do decisor (compensatória ou não compensatória).

Para apoiar decisões, existem alguns métodos mais usuais na literatura, à exemplo: (GUARNIERI, 2015; DE ALMEIDA; MORAIS; NURMI, 2019):

I. Métodos de critério único de síntese:

- MAUT (*Multiattribute Utility Theory*);
- SMART (*Simple Multi Attribute Rating Technique*);
- TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*);
- AHP (*Analytic Hierarchy Process*);
- FITradeoff (*Flexible and Interactive Tradeoff*).

II. Métodos de sobreclassificação:

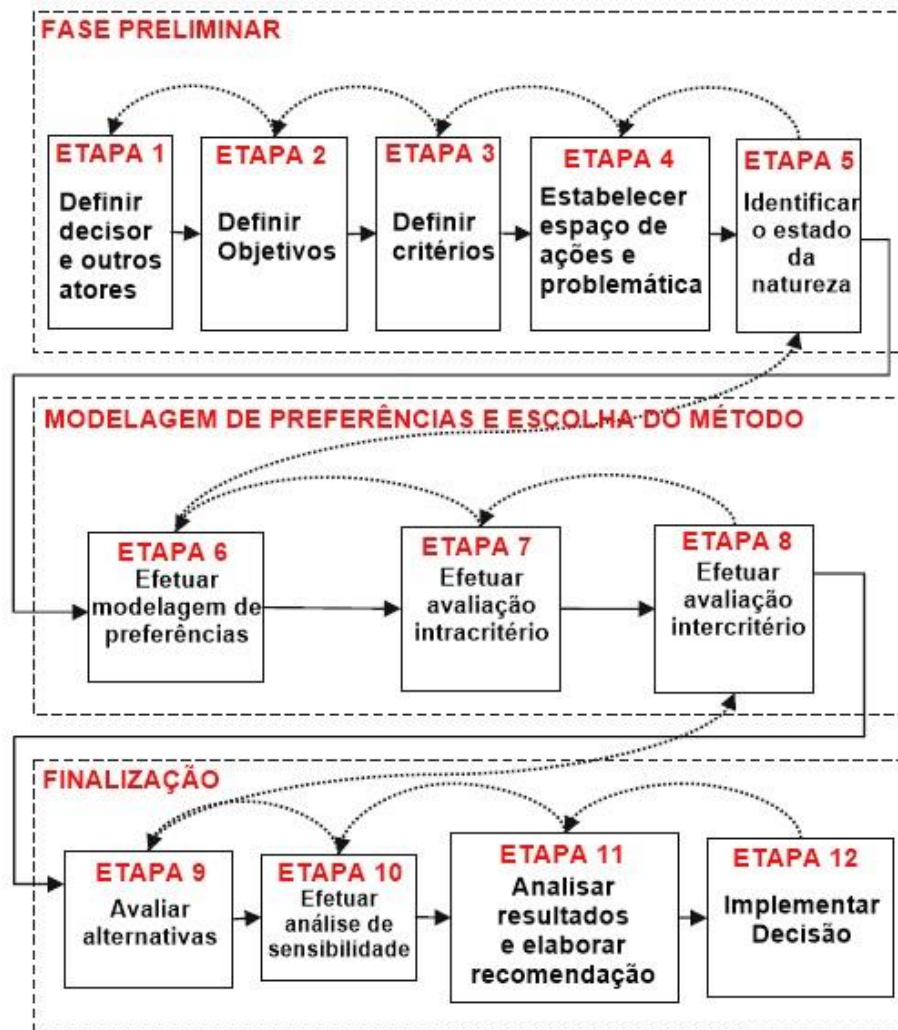
- ELECTRE (*Elimination and Choice Translating Algorithm*);
- PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method of Enrichment Evaluation*);

III. Métodos iterativos:

- STEM (*Step Method*);
- ICW (*Interval Criterion Weights*);
- Pareto Race;
- TRIMAP (*Tricriterion Multiobjective Linear Programming*).

Assim, já que cada método possui suas características particulares, é imprescindível que o analista determine qual método é mais condizente para fornecer apoio ao problema de decisão, que possui particularidades para serem levadas em consideração. De face disso, De Almeida *et al.* (2015) apresentam os procedimentos para resolução de um problema multicritério (Figura 4), detalhado através de 12 etapas que são subdivididos em três fases.

Figura 4 - Procedimento para resolução de um problema de decisão



Fonte: Adaptado De Almeida *et al.* (2015).

Como visto, o processo é baseado em uma abordagem sucessiva de refinamento, a partir de uma sequência estruturada para solução de problemas com vários critérios. Conforme supracitado, a primeira fase leva à estruturação do problema, na qual os elementos de um problema MCDM/A são explorados e expostos. A modelagem de preferências, segunda etapa do procedimento, refere-se à exploração dos julgamentos do tomador de decisão. É considerada a fase mais flexível, porque depende do método e explora profundas compreensões sobre o problema tratado. Finalmente, a terceira fase refere-se à resolução do problema de decisão impulsionado pela escolha e implementação da decisão. Vale ressaltar que a etapa de análise de sensibilidade é importante para garantir a acurácia da tomada de decisão.

O próximo tópico evidencia o método de decisão multicritério FITradeoff (*Flexible and Interactive Tradeoff*), que será utilizando em conjunto com o modelo *delay time* neste trabalho.

2.5.1 Método FITradeoff

Conforme apontam Gusmão e Medeiros (2016), o método FITradeoff foi concebido para buscar escolher a melhor alternativa de um conjunto de ações possíveis considerando o conceito de otimalidade potencial, dentro do escopo de Teoria de Valores Multiatributos (MAVT). Em sua concepção, De Almeida *et al.* (2016) destacam dois benefícios do método: o fato de que a exigência de informações por parte do decisor é reduzida e o aspecto de que esse método não precisa estabelecer relações de indiferença, levando em consideração apenas preferência estrita. Tal método foi desenvolvido tomando como base a forte estrutura axiomática do tradeoff tradicional (KEENEY; RAIFFA, 1993).

O FITradeoff é geralmente dividido em três etapas: primeiro ocorre a avaliação intra-critério, na qual uma função de valor marginal é obtida para cada critério; em sequência, ocorre a ordenação dos pesos dos critérios, considerando seu espaço de consequências. Por fim, ocorre o processo de elicitación flexível, onde o decisor expressa suas preferências considerando duas alternativas hipotéticas (KANG; SOARES JR.; DE ALMEIDA, 2018).

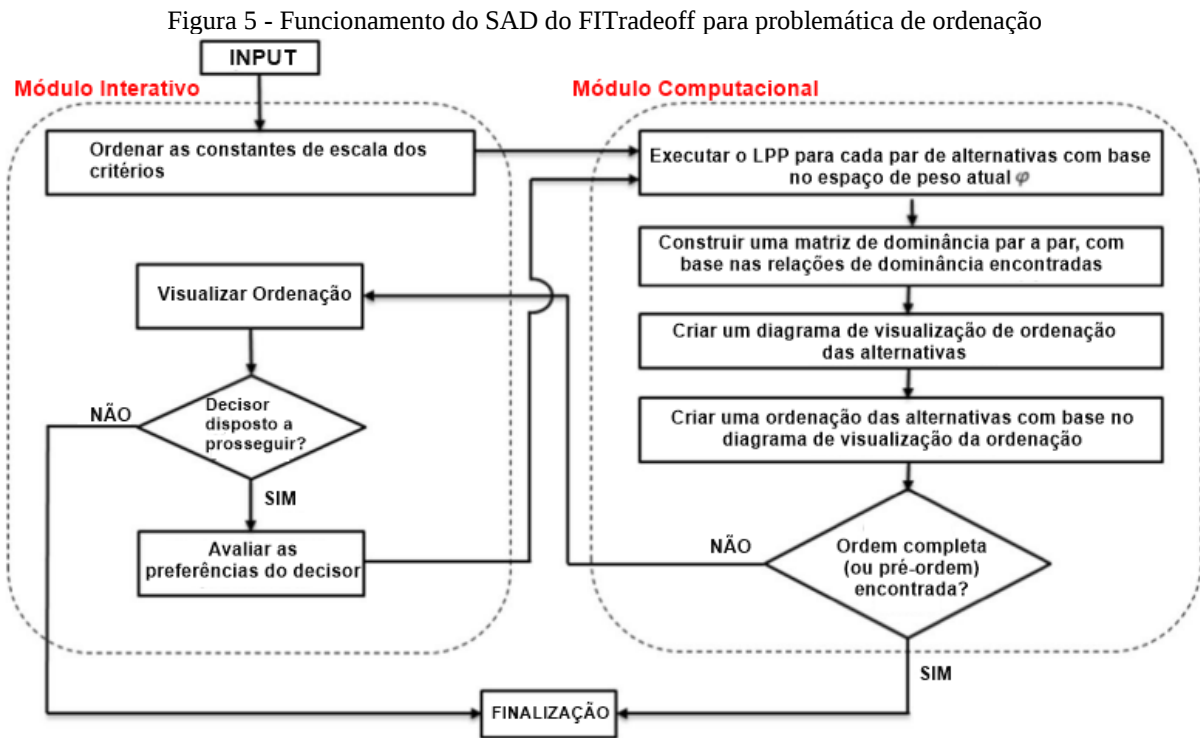
Para exemplificar essa interação existente no método, suponha que na etapa de ordenação foi definido que a constante de escala do critério *downtime* (k_2) é maior do que a constante de escala do critério *custo* (k_1). Nesse momento, o decisor deverá escolher se prefere uma consequência com o melhor valor do critério *downtime* – o menor *downtime*, considerando que o objetivo é minimizar – e o pior valor para os demais, ou uma consequência com valor intermediário no critério *custo* e o pior valor para os demais. Dessa forma, é possível reduzir o espaço de pesos, que varia de 0 a 1, e obter valores para os limites das constantes de escala.

Assim, através de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD), o método FITradeoff avalia sistematicamente as alternativas potencialmente ótimas através de problemas de programação linear (LPP). O processo termina quando uma solução única é encontrada ou quando o tomador de decisão não está disposto a fornecer informações adicionais (DELL'OVO *et al.*, 2017). Ressalta-se que, em muitos casos, os resultados parciais do método já são suficientes para o propósito do decisor. O SAD está disponível em: <http://fitradeoff.org/>.

Além do mais, é notável destacar que quando o FITradeoff foi concebido ele ficou limitado para apoiar apenas problemáticas de escolha. Frej, De Almeida e Costa (2019) estenderam ao conceito flexível e interativo a ideia de relações de dominância aos pares, a fim de obter uma ordem parcial ou completa durante a interação com o decisor. Neste caso,

incorporou-se a aplicação do método em problemática de ordenação (problemática considerada neste estudo).

O funcionamento do SAD para problemática de ordenação é visualizado na Figura 5, mostrando o processo consolidado através de dois módulos: a interação com o decisor e as etapas de computação interna do sistema.



Fonte: Adaptado de Frej, De Almeida e Costa (2019).

No LPP as alternativas recebem um valor global associado a Teoria do Valor Multiatributo (MAVT) para modelos aditivos determinísticos, conforme representação da Equação 6 (KEENEY; RAIFFA, 1976).

$$v(A_i) = \sum_{j=1}^m w_j v_j(A_i) \quad (6)$$

Onde:

- w_j := Constante de escala dos critérios;
- $v_j(A_i)$:= Payoff da alternativa A_i no critério c_j ;
- v_j := Função valor do critério c_j (normalizada com uma escala intervalar: 0 – pior consequência; 1 – melhor consequência).

Portanto, em cada etapa, para cada par de alternativa (A_i, A_k) , o LPP (Equação 7) é executado.

$$\text{Max } D(A_i, A_k) = \sum_{j=1}^m w_j v_j(A_i) - \sum_{j=1}^m w_j v_j(A_k), \quad \forall i, k; i \neq k \quad (7)$$

s.t.

$$w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_m$$

$$w_j v_j(x'_j) \geq w_{j+1} - \varepsilon, \quad j = 1 \text{ a } m - 1$$

$$w_j v_j(x''_j) \leq w_{j+1} + \varepsilon, \quad j = 1 \text{ a } m - 1$$

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1$$

$$w_j \geq 0, \quad j = 1 \dots m$$

Nesse LPP, a função objetivo busca maximizar a diferença entre o valor global do par de alternativas A_i e A_k , onde as variáveis de decisão são as constantes de escala w_j . A primeira restrição representa a ordenação das constantes de escala, enquanto a segunda e a terceira dizem respeito as declarações estabelecidas pelo decisor (podendo ser preferência estrita, indiferença ou incomparabilidade), quando ele compara alternativas hipotéticas. Por fim, a quarta e quinta correspondem, respectivamente, a normalização dos pesos e a não-negatividade.

3 MODELO DE INSPEÇÃO MULTICRITERIAL PARA GASODUTOS

Este capítulo apresenta o modelo desenvolvido para o planejamento da manutenção em válvulas de gasodutos. Apresenta-se os critérios a serem avaliados e ressalta-se a importância da possibilidade de ocorrerem erros de julgamento durante as inspeções, de forma que as probabilidades da existência de falsos negativos estejam incluída na modelagem do problema.

3.1 Modelo Multicritério para Definição de Tempos de Inspeção

Conforme já exposto anteriormente, a definição dos tempos de inspeção tem implicações em distintas dimensões, sendo apropriada uma visão mais abrangente, que ao mesmo tempo em que trata dos conflitos entre os critérios, insere as preferências do decisor como parâmetro do modelo. O modelo proposto teve como inspiração o modelo de Jia e Christer (2002), contudo ao invés de se tratar de um problema de maximização da disponibilidade, trata o *downtime* como um critério, propõe uma função custo a ser considerada como um critério a minimizar e apresenta o número de membros dedicados a manutenção como um terceiro critério a ser reduzido.

Dado o supracitado, observa-se que, apesar da disponibilidade ser um critério essencialmente importante no planejamento das ações de manutenção, a busca por menores *downtime* não pode se dar a qualquer custo, nesse sentido, os custos das distintas políticas (períodos diferentes de inspeção) são avaliados. Da Silva e Lopes (2018), mostram que a maioria dos modelos de manutenção que consideram o *delay time* como metodologia de modelagem buscam reduzir o custo durante a vida útil do componente. Assim, é nítida a relevância da observação desse critério, pois os gerentes das empresas apenas estarão dispostos a investir se houver alguma eficácia, mesmo que a longo prazo.

Em outra perspectiva, a disponibilidade de ativos têm um impacto direto na competitividade das organizações (HENG *et al.*, 2009). A importância de avaliar o *downtime* se dá pelo fato de que quanto mais tempo o componente fica inativo, mais perdas de material ocorrem. Tal perdas são crescentes até o momento em que o sistema seja restaurado ao estado operacional ou substituído. Em outro pensamento, altos *downtimes* nesse tipo de sistema causa perda de uma boa imagem das organizações, o que implica negativamente nas negociações existentes.

Ademais, considerando que sistemas de gasodutos possuem inúmeros componentes, torna-se essencial o estabelecimento de cronogramas de manutenção que funcionem como uma espécie de planejamento para a organização. Todavia, esse planejamento pode ter periodicidades distintas ou iguais, dependendo da degradação dos componentes, que podem variar e causar falhas em momentos variados. É à luz dessa consideração que esse trabalho enaltece a importância das empresas possuírem pessoas disponíveis (mesmo que sejam terceirizadas) para realizar manutenções em múltiplos componentes, já que, por exemplo, a equipe de manutenção pode estar inspecionando um componente em um local *X* e no mesmo momento ocorrer uma falha catastrófica em outro local *Y*.

Portando, um terceiro critério a ser avaliado será o número de pessoas dedicadas a manutenção (redução de visitas a válvula). O objetivo aqui é reduzir o número de membros que executam a inspeção, correção ou ação preventiva na válvula de proteção durante toda a sua vida útil. A intenção é que em momentos que exijam muita força de trabalho, existam mantenedores disponíveis, não carecendo intervir fora do planejamento/orçamento. Além de tudo, quanto menor for a equipe, mais fácil será o deslocamento para o local e mais rápido ocorrerá a manutenção.

À vista disso, as melhores políticas serão aquelas que equilibrarem uma boa performance em termos de *downtime*, a custos admissíveis e com um número de equipe aceitável, estando mais alinhados de acordo com as preferências do decisor.

3.2 Estruturação do Modelo Proposto

O modelo de Jia e Christer (2002) tem como conceito fundamental o *delay-time*. Esse conceito foi aplicado pela primeira vez por Christer (1982), envolvendo um contexto de manutenção predial, e rapidamente teve grande repercussão dentro do contexto de manutenção, podendo-se observar atualmente, uma grande quantidade de trabalhos que usam esse conceito fundamental para o desenvolvimento de modelos de manutenção (SCARF; CAVALCANTE, 2008; SCARF *et al.*, 2009; CAVALCANTE *et al.*, 2009; BERRADE; SCARF; CAVALCANTE, 2017).

Inspirado na forma prática como os engenheiros tratavam o processo de identificação e reparo de defeitos, o conceito de *delay time* formaliza o processo de decisão associado à definição de políticas de manutenção, suportadas por meio de modelos matemáticos. Ao se

fazer uso do conceito de *delay time*, normalmente, considera o item, ou o sistema, como tendo três estados: (0) estado operacional normal, (1) estado defeituoso, (2) estado falho.

Assim, o *delay time* (h) representa o tempo decorrido desde o surgimento do defeito (x) até o momento em que este ocasiona uma falha no sistema. Como impacto prático, observa-se que se as atividades de inspeção forem realizadas durante este intervalo de tempo ($x, x+h$), o defeito é descoberto e a manutenção preventiva é desempenhada, como, por exemplo, a substituição ou o reparo do componente defeituoso. Por outro lado, se acontecer do *delay time* não for suficientemente grande para ultrapassar o tempo restante até a próxima inspeção, o componente ou sistema irá falhar e, conseqüentemente, atividades corretivas de manutenção serão acionadas, acarretando, na maioria das vezes, maiores custos e intervalos de tempos mais extensos para o restabelecimento da condição operacional normal, o que na verdade se traduz por um interrupção maior do processo produtivo. No caso específico, mesmo que sejam pequenos os prolongamentos nas interrupções no fornecimento de gás, por qualquer que seja o motivo, pode ocasionar amplificações substanciais nas conseqüências, bem como podem favorecer para que estas sejam transmitidas a vários clientes atendidos por essa malha de dutos. Nesse sentido, pode-se observar o quanto é importante a adequada definição dos tempos entre inspeções.

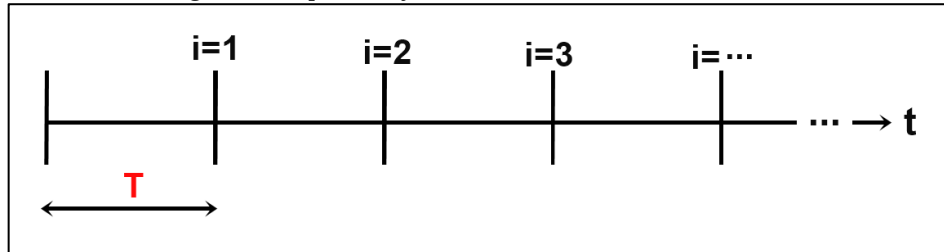
Destaca-se também que muitas vezes podem ocorrer erros de julgamento por parte do inspetor, o que pode invalidar modelos que não consideram esse cenário, dificultando ainda mais o planejamento adequado de manutenção. Assim, de forma a adequar o modelo a essa realidade, considera-se a existência de manutenção imperfeita, que, segundo Do *et al.* (2015), existem várias causas para a sua presença, entre elas: fatores associados aos humanos (estresse, falta de habilidades, falta de atenção), falta de peças sobressalentes e falta de tempo de reparo.

Assim, o modelo desta pesquisa considera que existe a possibilidade da ocorrência de erros de julgamento após uma inspeção, no momento em que o estado funcional do sistema é identificado como bom, mas na verdade está falho (falso negativo). Nesse contexto, Berrade, Cavalcante e Scarf (2012) afirmam que a probabilidade (β) de não ser detectado um defeito presente em uma inspeção (falso negativo) depende da complexidade do dispositivo, bem como do nível de habilidade do mantenedor.

Dessa maneira, o modelo supracitado possui como variável de decisão T , conforme representado pela Figura 6, e essa, por sua vez, terá seus valores otimizados para cada critério a partir das características específicas do sistema ao qual se está aplicando o modelo, à exemplo

da taxa de falha e do *delay time*, que são *inputs* para a modelagem. No modelo multicriterial, o T não é otimizado, pois trata-se de avaliação da performance de critérios conflitantes.

Figura 6 - Representação da variável de decisão do modelo



Fonte: O Autor (2020).

A disposto disso, na ocorrência de cada intervalo entre inspeções (ilustrados mediante a Figura 6) três cenários podem ocorrer: o defeito surgir e ser identificado na próxima inspeção antes que ocorra uma falha; o defeito surgir e falhar antes da próxima inspeção; o defeito surgir e o inspetor não identificar a presença do mesmo, postergando-o, por causa de erros de julgamento, para o próximo intervalo de manutenção, que está sujeito aos mesmos cenários.

Dessa forma, para a modelagem aqui desenvolvida, algumas hipóteses comuns aos modelos que se baseiam no conceito de *delay time* também são válidas, além disso, para a construção da função custo, algumas considerações foram acrescentadas. Seguem-se então as principais suposições que devem ser observadas:

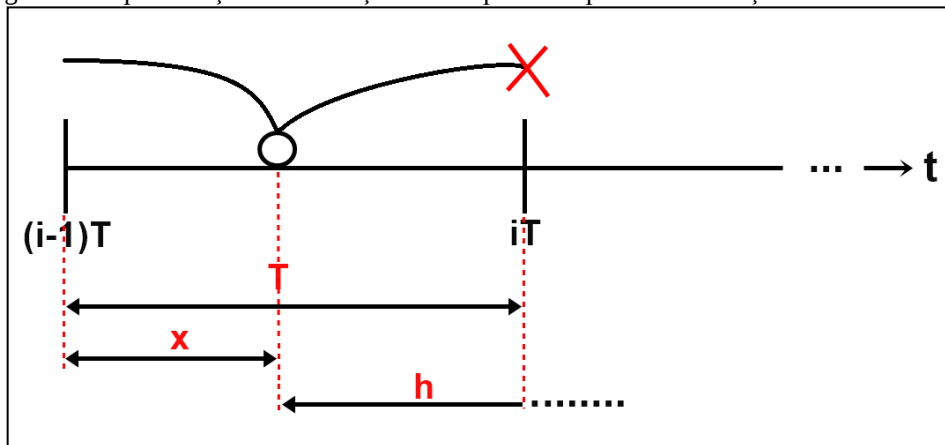
- Considera-se que no componente existe um modo de falha dominante que necessita ser observado;
- O defeito surge no instante x . As distribuições acumuladas (CDF) e de densidade (PDF) de x são conhecidas e denotadas, respectivamente, por $F_x(x)$ e $f_x(x)$;
- O intervalo *delay time* h , é também uma variável aleatória cujas a distribuição acumulada (CDF) e a de densidade (PDF) são também conhecidas, sendo essas denotadas por $F_h(h)$ e $f_h(h)$, respectivamente;
- O sistema não se deteriora durante a inspeção;
- As inspeções são efetuadas regularmente nos instantes iT , $i = 1, 2, \dots$, onde, T é a variável de decisão;
- A inspeção não é perfeita, ou seja, se existir algum defeito presente, este pode não ser observado (falso negativo);

- Os tempos relativos à inspeção, à substituição preventiva e à substituição devido a falha não são considerados no modelo;
- Os custos relativos à inspeção, a substituição preventiva e a substituição devido à falha são respectivamente, representados por C_i , C_r , C_f . É importante notar que $C_i < C_r < C_f$;
- Os números de equipes designadas para inspeção, substituição preventiva e a substituição corretiva, são representados por E_i , E_r , E_f , respectivamente, onde $E_i < E_r < E_f$;
- $V(T)$ representa o tempo de vida total esperado do sistema (válvula), ou seja, o comprimento do ciclo de renovação do componente;
- $D(T)$ representa o tempo esperado de *downtime* (de processo interrompido) do sistema;
- $W(T)$ é o *downtime* a cada ciclo de renovação;
- $U(T)$ representa o custo esperado de manutenção do sistema;
- $C(T)$ é o custo de manutenção do sistema em um ciclo de renovação;
- $EQ(T)$ expressa o número de equipes esperado para manutenção do sistema;
- $Y(T)$ representa o número de equipes em um ciclo de renovação.

Assim sendo, para cada intervalo de entre inspeções são consideradas as probabilidades de ocorrerem três cenários, descritos e ilustrados com mais detalhes a seguir.

- **Cenário 1:** O primeiro cenário (Figura 7) diz respeito a quando o defeito surge no i -ésimo intervalo entre inspeções e o componente é substituído na j -ésima inspeção, evitando que ocorra uma falha.

Figura 7 - Representação da renovação do componente após a identificação de um defeito (O)



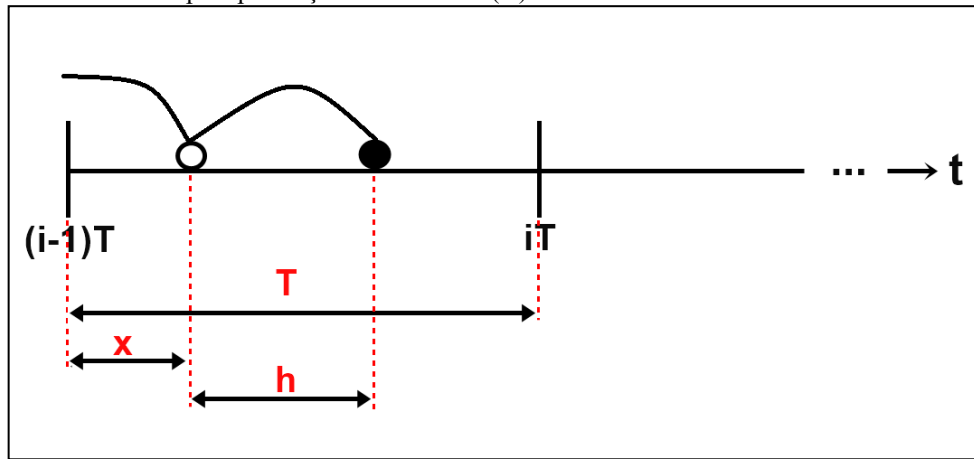
Fonte: O Autor (2020).

Dado o caso, a probabilidade da ocorrência do primeiro cenário $P_1(T)$ é dada pela Equação 8:

$$P_1(T) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^j \left[\int_{(i-1)T}^{iT} \beta^{j-i} (1 - \beta) f_x(x) R_h(jT - x) dx \right] \quad (8)$$

- **Cenário 2:** Verifica-se na Figura 8 que neste cenário a falha não é mais evitada. O defeito surge no i -ésimo intervalo entre inspeções e o componente falha antes da j -ésima inspeção.

Figura 8 - Representação da renovação do componente após o surgimento de uma falha (●), que foi ocasionada pela presença de um defeito (O) em um momento anterior



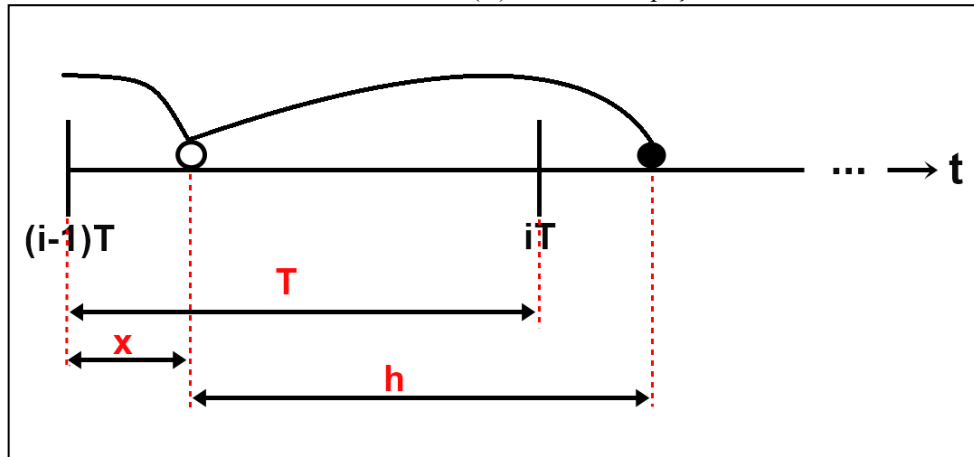
Fonte: O Autor (2020).

É possível então calcular a probabilidade para a ocorrência do segundo cenário $P_2(T)$, conforme demonstra a Equação 9:

$$P_2(T) = \sum_{i=1}^{\infty} \left[\int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) F_h(iT - x) dx \right] \quad (9)$$

- **Cenário 3:** Este cenário também representa o surgimento de uma falha, ilustrado na Figura 9. Ocorre que, no momento em que o defeito surge no i -ésimo intervalo entre as inspeções, ele não é detectado nas inspeções posteriores (ocorrência de um falso negativo) e o componente falha.

Figura 9 - Representação da renovação do componente em uma falha (●), após um falso negativo que não identificou o defeito (○) durante a inspeção iT



Fonte: O Autor (2020).

É possível então, pela Equação 10, desenvolver o cálculo da probabilidade para o terceiro cenário $P_3(T)$.

$$P_3(T) = \sum_{j=2}^{\infty} \sum_{i=1}^{j-1} \left\{ [\beta^{j-i} \int_{(i-1)T}^{iT} \int_{(j-1)T-x}^{jT-x} f_x(x) f_h(h) dh dx] \right\} \quad (10)$$

Considerando as probabilidades aludidas, a Equação (11) constitui as variáveis para o cálculo do tempo de vida total do componente (válvula).

$$\begin{aligned} V(T) := & \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^j \left[jT \int_{(i-1)T}^{iT} \beta^{j-i} (1 - \beta) f_x(x) R_h(jT - x) dx \right] \\ & + \sum_{j=2}^{\infty} \sum_{i=1}^{j-1} \left\{ jT [\beta^{j-i} \int_{(i-1)T}^{iT} \int_{(j-1)T-x}^{jT-x} f_x(x) f_h(h) dh dx] \right\} \\ & + \sum_{i=1}^{\infty} \left[iT \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) F_h(iT - x) dx \right] \end{aligned} \quad (11)$$

A Equação (12) representa o tempo esperado de *downtime* (inatividade do sistema), considerando mesmas probabilidades anteriormente mencionadas. É importante ressaltar que, nos momentos em que o inspetor identifica o defeito e previne a falha, a válvula não apresenta indisponibilidade.

$$D(T) := \sum_{j=2}^{\infty} \sum_{i=1}^{j-1} \left\{ \beta^{j-i} \int_{(i-1)T}^{iT} \int_{(j-1)T-x}^{jT-x} [jT - (x+h)] f_x(x) f_h(h) dh dx \right\} \\ + \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} \int_0^{iT-x} [iT - (x+h)] f_x(x) f_h(h) dh dx \quad (12)$$

O *downtime* esperado pelo comprimento do ciclo de renovação é dado pela Equação (13). Vale salientar que, para este trabalho não foram levados em consideração os tempos necessários para realizar inspeção, manutenção corretiva e manutenção preventiva. Esse aspecto pode ser observado em trabalhos futuros.

$$W(T) = \frac{D(T)}{V(T)} \quad (13)$$

O custo esperado de manutenção é dado pela Equação (14):

$$U(T) := \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^j \left[(jC_i + C_r) \int_{(i-1)T}^{iT} \beta^{j-i} (1-\beta) f_x(x) R_h(jT-x) dx \right] \\ + \sum_{j=2}^{\infty} \sum_{i=1}^{j-1} \left\{ (jC_i + C_f) [\beta^{j-i} \int_{(i-1)T}^{iT} \int_{(j-1)T-x}^{jT-x} f_x(x) f_h(h) dh dx] \right\} \quad (14) \\ + \sum_{i=1}^{\infty} \left[(jC_i + C_f) \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) F_h(iT-x) dx \right]$$

Assim, o custo esperado de manutenção por unidade de tempo é expresso pela Equação (15).

$$C(T) := \frac{U(T) + \mu D(T) \cdot ca}{V(T)} \quad (15)$$

Onde:

- ca := Custo por cada demanda não atendida;
- μ := Número de demandas.

A Equação (15) expressa uma característica importante da válvula. Esse componente é tipicamente inativo por determinados tempos e sua ativação é requerida em situações de emergência, expressas através do número de demandas. Conforme muito bem explicam Alberti *et al.* (2018), caso surja uma demanda e a válvula esteja falha, podem haver perdas de suprimento e, dependendo da pressão operacional do segmento, inundações e erosões, bem como segmentos adjacentes devem ser isolados, deixando uma maior número de clientes sem serviço.

Ademais, o número de equipes esperado de manutenção é dado pela Equação (16):

$$EQ(T) := \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^j \left[(jE_i + E_r) \int_{(i-1)T}^{iT} \beta^{j-i} (1 - \beta) f_x(x) R_h(jT - x) dx \right] \\ + \sum_{j=2}^{\infty} \sum_{i=1}^{j-1} \left\{ (jE_i + E_f) [\beta^{j-i} \int_{(i-1)T}^{iT} \int_{(j-1)T-x}^{jT-x} f_x(x) f_h(h) dh dx] \right\} \quad (16) \\ + \sum_{i=1}^{\infty} \left[(jE_i + E_f) \int_{(i-1)T}^{iT} f_x(x) F_h(iT - x) dx \right]$$

Por fim, o número de equipes esperado em um ciclo de renovação é dado pela Equação (17):

$$Y(T) = \frac{EQ(T)}{V(T)} \quad (17)$$

Acrescenta-se que, a função densidade de probabilidade (PDF) dos tempos de chegada de um defeito foi adotada como sendo uma *Weibull*, sendo representada pela Equação (18).

$$f_x(x) = \left[\left(\frac{\beta e}{\eta} \right) \cdot \left(\frac{x}{\eta} \right)^{\beta e - 1} \cdot \left(e^{-\left(\frac{x}{\eta} \right)^{\beta e}} \right) \right] \quad (18)$$

As distribuições dos tempos de *delay time* e da distribuição acumulada de densidade (CDF), são dadas respectivamente pelas Equações (19) e (20).

$$f_h(h) = \lambda e^{(-\lambda h)} \quad (19)$$

$$F_h(h) = 1 - e^{(-\lambda h)} \quad (20)$$

Face das considerações aludidas, a validação dos cenários desenvolvidos foi verificada por meio do somatório das probabilidades de ocorrência dos mesmos ($P_1(T) + P_2(T) + P_3(T)$), que totalizou 1 (um). Ou seja, 100% dos cenários que podem acontecer durante um ciclo de renovação foram considerados na proposta do modelo.

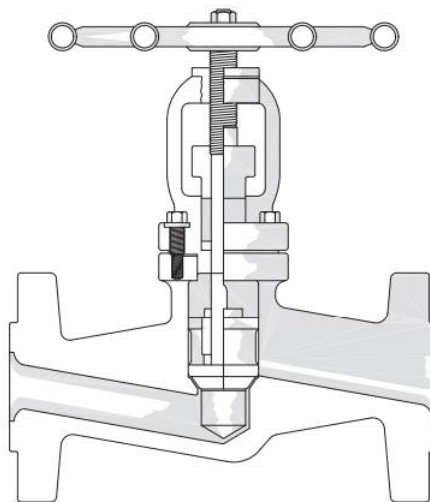
4 ESTUDO NUMÉRICO

Neste capítulo executa-se uma aplicação numérica em meio a um contexto que se aproxima o máximo possível da realidade. No segundo tópico, observam-se os resultados finais gerados quando ocorrem alterações nos parâmetros de entrada, de forma a avaliar a robustez do modelo (análise de sensibilidade).

4.1 Aplicação do Modelo

No estudo numérico, ilustra-se a aplicação do modelo no contexto de uma empresa de distribuição de gás natural, onde existe a presença de uma válvula de bloqueio, representada pela ilustração da Figura 10.

Figura 10 - Válvula de bloqueio



Fonte: Adaptado de Stewart (2015).

Aqui são apresentados dados realísticos para *inputs*, todavia, frisa-se que não houve sucesso ao contactar empresas para obter um decisor das mesmas. De qualquer forma, é possível observar a utilidade do modelo quando um cenário real puder ser usado. Considera-se que, vários clientes podem ser atendidos ao mesmo tempo por uma rede de gasodutos. Uma única linha de duto pode suportar diversas ramificações, e, através destas, o abastecimento de inúmeros pontos são realizados.

Além disso, os principais clientes do serviço prestado pelas distribuidoras de gás, através de gasodutos, são as grandes indústrias que têm o gás natural como matéria-prima do

processo produtivo, agindo como combustível, como as termoeletricas, que necessitam do gás para a geração de energia elétrica, que analogamente vai suprir a demanda das empresas; postos de gasolina, que comercializam o gás como combustível de veículos; e, finalmente, até pequenas e médias empresas que estejam instaladas em áreas metropolitanas.

Em razão da imensa margem de clientes, instalados geograficamente em diversos pontos diferentes, as linhas de dutos estão espalhadas em várias áreas ao longo da superfície ou, em muitos casos, abaixo dela. Os gasodutos podem ser encontrados, principalmente, ao longo de sítios industriais, onde sua concentração é maior, devido à demanda. Porém, até chegar ao parque industrial ou outros destinos finais, podemos encontrá-los em meio a povoados, beirando estradas, dentro de cidades, atravessando leitos de rios, lagoas, perto de áreas de preservação ambiental, entre outros. Nesse sentido, a fim de reduzir os riscos associados a falhas em gasodutos, o processo de dimensionamento dos números de válvulas é regulado, sendo essas, imprescindíveis para o processo de bloqueio e isolamento de áreas afetadas.

Neste artigo, a empresa sob estudo é responsável pelo perfeito abastecimento de gás natural em uma malha de gasodutos. Dentro desse contexto, identificou-se nessa malha, como projeto piloto inicial, uma válvula de bloqueio crítica, cuja falha causaria danos bastante significativos.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros associados às distribuições, utilizados durante a modelagem de manutenção. Considera-se que a função de chegada do defeito, $f_x(x)$, segue uma distribuição *Weibull* com parâmetro de forma $\beta e = 3$ e parâmetro de escala $\eta = 1200$. Já para a função de distribuição do *delay time*, $f_h(h)$, foi considerada uma distribuição exponencial com parâmetro $\lambda = 1/300$ (ou seja, o *delay time* médio é 300).

Tabela 4 - Parâmetros associados às distribuições

	Tipo	Parâmetros
$f_x(x)$	weibull	$\beta e = 3$ $\eta = 1200$
$f_h(h)$	Exponencial	$\lambda = 1/300$

Fonte: O Autor (2020).

Para esse tipo de válvula, testes ou inspeções geralmente são feitos. Atribuindo-se alguns valores para a aplicação do modelo, foram parametrizados os custos associados ao modelo proposto, em valores monetários por unidade de tempo (Tabela 5).

Tabela 5 - Custos associados às ações de manutenção

Custos	$C_i=15$	$C_r=25$	$C_f=60$
---------------	----------	----------	----------

Fonte: O Autor (2020).

O número de equipes está estabelecido na Tabela 6.

Tabela 6 - Número de membros em cada equipe de manutenção

Número de equipes	$E_i=2$	$E_r=3$	$E_f=5$
--------------------------	---------	---------	---------

Fonte: O Autor (2020).

Além disso, é possível observar na Tabela 7 as atribuições para a probabilidade (β) de não ser detectado uma falha presente em uma inspeção, o custo (ca) por uma demanda não atendida e o número de vezes (μ) que a demanda não foi atendida, sendo β determinado de acordo a média de erros de julgamentos que ocorreram nas últimas inspeções (histórico).

Tabela 7 - Parâmetros de Input

β	0,10
ca	400
	5
μ	300

Fonte: O Autor (2020).

Foram eleitos os tempos múltiplos de 15 dias (Tabela 8), como sendo as alternativas de tempos ideais para se fazer as inspeções. Observa-se que, dada as características das funções de custo, do *downtime* e do número de membros equipe, matematicamente essa consideração não causa impactos significativamente negativos, porém imputa uma facilidade gerencial, uma vez que na prática o conjunto de tempos é discreto.

Tabela 8 - Alternativas de decisão

Alternativas de Tempo T												
15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195
210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	375	390

Fonte: O Autor (2020).

Uma vez definidas as alternativas, essas foram avaliadas em cada um dos critérios (custo, *downtime* e número de membros da equipe), durante o final de cada ciclo de renovação. As performances das alternativas em cada critério podem ser vistas na Tabela 9.

Tabela 9 - Matriz consequências

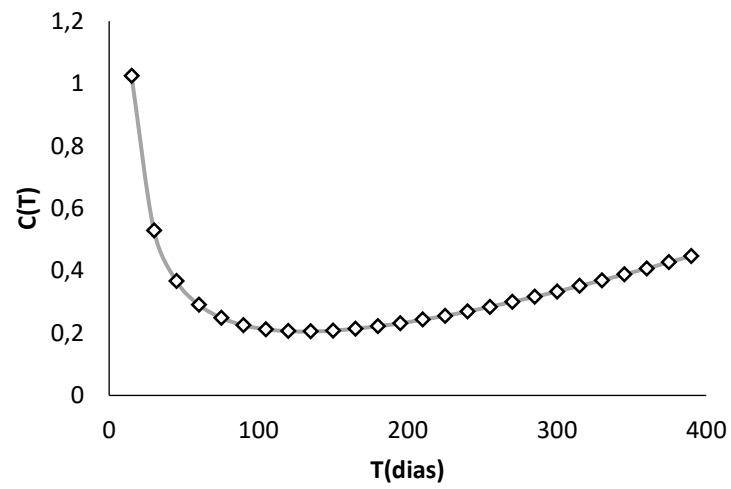
Alternativas de Tempo T	Custo C(T)	Downtime W(T)	Equipe Y(T)	Alternativas de Tempo T	Custo C(T)	Downtime W(T)	Equipe Y(T)
15	1,025	0,0001510	0,136	210	0,243	0,021	0,013
30	0,529	0,0005869	0,070	225	0,255	0,024	0,012
45	0,367	0,0012840	0,047	240	0,269	0,026	0,011
60	0,291	0,0022200	0,036	255	0,284	0,029	0,011
75	0,249	0,0033760	0,030	270	0,3	0,032	0,01
90	0,225	0,0047330	0,025	285	0,316	0,035	0,01
105	0,212	0,0062750	0,022	300	0,333	0,038	0,009743
120	0,206	0,0079880	0,020	315	0,351	0,041	0,009427
135	0,205	0,0098570	0,018	330	0,369	0,044	0,009139
150	0,208	0,012	0,016	345	0,388	0,047	0,008876
165	0,214	0,014	0,015	360	0,407	0,05	0,008634
180	0,222	0,016	0,014	375	0,427	0,053	0,008411
195	0,231	0,019	0,013	390	0,447	0,056	0,008204

Fonte: O Autor (2020).

Observa-se que há conflitos no desempenho dos critérios. Alternativas com os melhores desempenhos no critério custo, não correspondem as alternativas com os melhores desempenhos no critério *downtime*, nem tão pouco no critério que corresponde ao número de membros na equipe. Na prática isto significa que disponibilidade muito alta é conseguida a um custo bastante elevado e com uma alta quantidade de funcionários se dedicando a manutenção dos equipamentos. Nesse sentido, a questão fundamental é observar alternativas que tenham bom desempenho nos três critérios e que estejam mais bem alinhadas com as preferências do decisor em questão. Nesse sentido, lança-se mão do método FITradeoff.

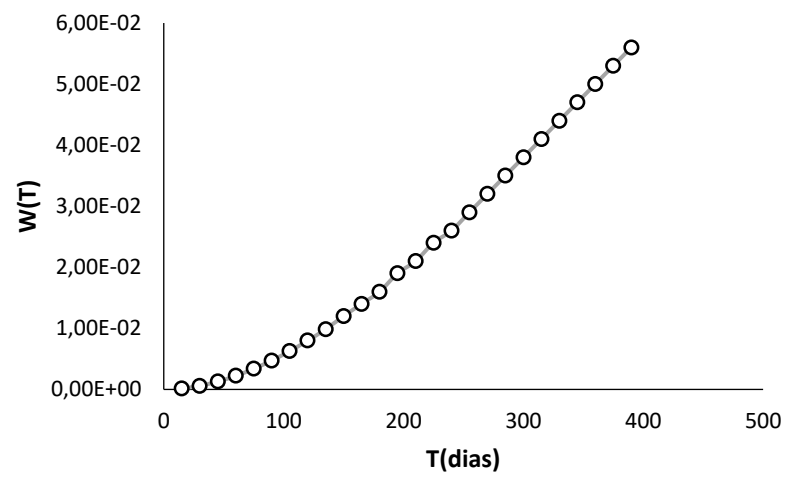
Em consonância com o supracitado, Gráficos 1,2,3 representam o comportamento das funções para o conjunto de alternativas. Observa-se que, quando se trata do critério custo por unidade de tempo, T acima 150 dias não é mais uma zona de interesse do decisor, pois o custo tende a aumentar. Em outra visão, o *downtime* aumenta e o número da equipe reduz a medida em que os intervalos de manutenção aumentam.

Gráfico 1- Comportamento da função “custo” para o conjunto de alternativas



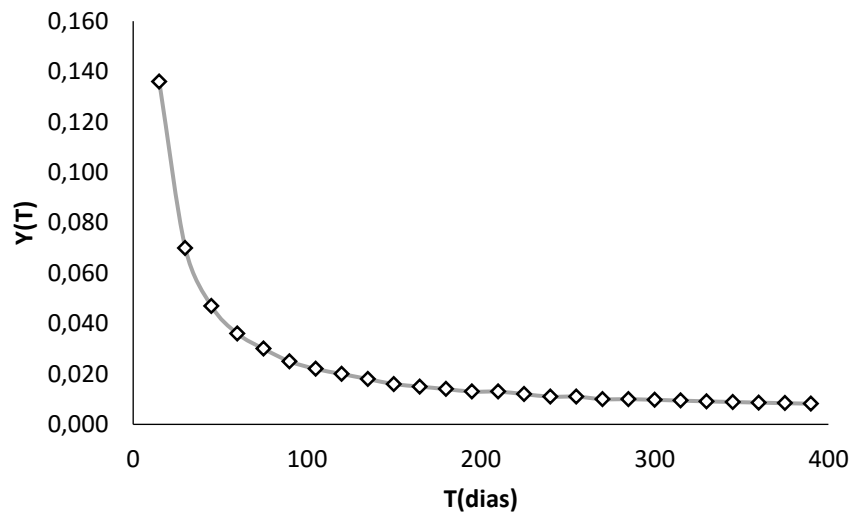
Fonte: O Autor (2020).

Gráfico 2 - Comportamento da função “downtime” para o conjunto de alternativas



Fonte: O Autor (2020).

Gráfico 3 - Comportamento da função “número de pessoas na equipe” para o conjunto de alternativas



Fonte: O Autor (2020).

Nesse viés, um aspecto importante a ser destacado refere-se à natureza da problemática em questão, classificada como Problemática de Ordenação ($P.\gamma$), já que têm como objetivo a construção de um *ranking* das alternativas em ordem decrescente de preferência (ROY, 1996). A existência dessa problemática se justifica pelo fato de que pode ser definido o melhor intervalo de inspeção para as válvulas, mas esse pode ser inviável quando encaixado no planejamento do cronograma já estabelecido pela equipe de manutenção. Sendo assim, o decisor pode observar qual a segunda alternativa mais favorável, a terceira, e assim sucessivamente.

A estrutura de preferências e a racionalidade do decisor foram aqui consideradas como estrutura ($P.I$) e a racionalidade compensatória. Tais aspectos foram adotados porque não foi possível contactar um decisor para a aplicação numérica, sendo assim, essas suposições são feitas para observar o comportamento do modelo nesses casos.

Em sequência, dado que a estrutura de preferências é a estrutura (P, I), afere-se que o decisor é capaz de comparar todas as alternativas por meio das relações de preferência estrita (P) ou indiferença (I) (verificando ordenabilidade), obtendo uma relação simétrica e outra assimétrica. Além disso, a racionalidade do decisor para o problema em questão, por sua vez, considerada como compensatória, determina que o mesmo se importa o quanto duas consequências são melhores em cada critério, ou seja, existe a ideia de compensar um menor desempenho de uma alternativa em um dado critério por maior desempenho em outro

Em outro momento, julgou-se que existe por parte do decisor uma propriedade de transitividade. Dessa forma, considerando que essas propriedades são atendidas, um método diagnosticado como apropriado para o problema é o de critério único de síntese (modelo de agregação aditivo). Dado essa discussão, avaliou-se o método FITradeoff como bastante adequado com as características observadas no problema em estudo.

Seguindo-se os passos do método FITradeoff, o decisor estabelece a ordenação dos pesos dos critérios, considerando seu espaço de consequências. Após a etapa de ordenação, ocorre a elicitación flexível, onde o decisor expressa suas preferências considerando duas alternativas hipotéticas. Uma das etapas da elicitación, por exemplo, ocorre no momento em que o tomador de decisões opta por escolher a consequência B, que apresentou o pior desempenho para o critério custo (C1) e o melhor desempenho para o critério *downtime* (C1), do que a consequência A, que representava o desempenho intermediário no critério custo e o pior desempenho para o critério *downtime*.

É possível observar o resultado da elicitación flexível na Tabela 10.

Tabela 10 - Ordenação das alternativas

Ordenação	Alternativas	Ordenação	Alternativas
1º	[T105]	14º	[T240]
2º	[T120]	15º	[T255]
3º	[T90]	16º	[T270]
4º	[T135]	17º	[T285]
5º	[T75]	18º	[T30]
6º	[T150]	19º	[T300]
7º	[T165]	20º	[T315]
8º	[T60]	21º	[T330]
9º	[T180]	22º	[T345]
10º	[T195]	23º	[T360]
11º	[T210]	24º	[T375]
12º	[T45]	25º	[T390]
13º	[T225]	26º	[15]

Fonte: O Autor (2020).

Pela representação da Tabela 10 fica perceptível que a alternativa preferível foi aquela que possui T=105, com custo igual a 0,212 unidades monetárias, *downtime* igual a $62,75 \times 10^{-4}$ unidades de tempo e número de membros na equipe igual a 0,022 por cada ciclo de renovação, sendo apresentado uma ordem completa.

Além disso, apesar de em algum momento o decisor ter especificado um ponto de indiferença entre duas consequências, frisa-se que no método FITradeoff tal escolha não seria necessária para obter o resultado final, diferentemente do tradicional Tradeoff que exige do decisor a necessidade de especificar um ponto de indiferença. Neste problema em específico, as constantes de escala obtidas após a aplicação do método são demonstradas na Tabela 11.

Tabela 11 - Constantes de escala

<i>Critério</i>	<i>Limite Mínimo</i>	<i>Limite Máximo</i>
<i>Custo (k_1)</i>	<i>0.564342794</i>	<i>0.566998893</i>
<i>Downtime (k_2)</i>	<i>0.299807109</i>	<i>0.301218162</i>
<i>Nº de membros da equipe (k_3)</i>	<i>0.131782946</i>	<i>0.135850096</i>

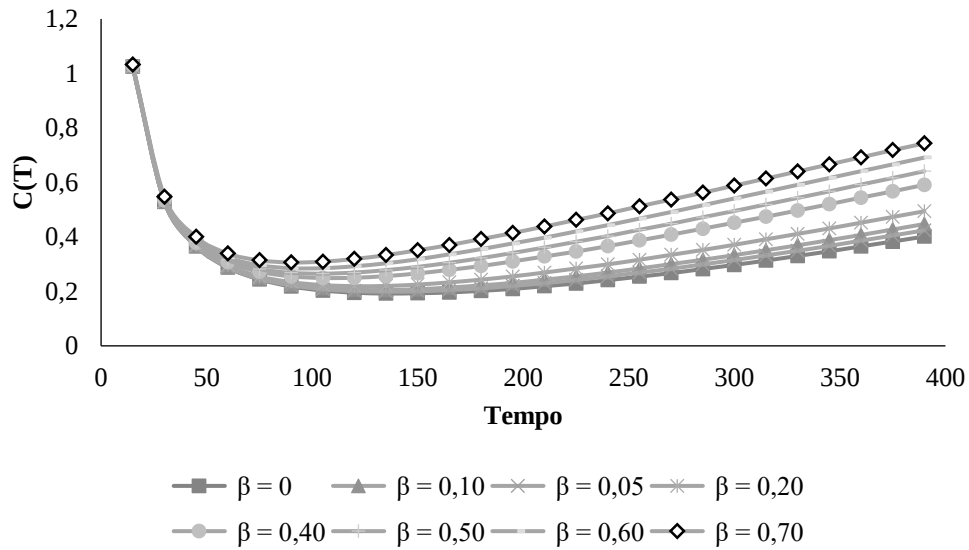
Fonte: O Autor (2020).

Pode-se observar que, as melhores alternativas não correspondem nem ao melhor *downtime*, nem tão pouco ao menor custo, muito menos a um menor número de membros na equipe de manutenção. Quando observamos as melhores soluções para cada critério, percebemos que tal opção não leva a melhor escolha global. Deste modo, a otimização de um único critério, seja a minimização do *downtime*, minimização do custo ou minimização do número de funcionários na equipe, não é satisfatória.

4.2 Análise de Sensibilidade

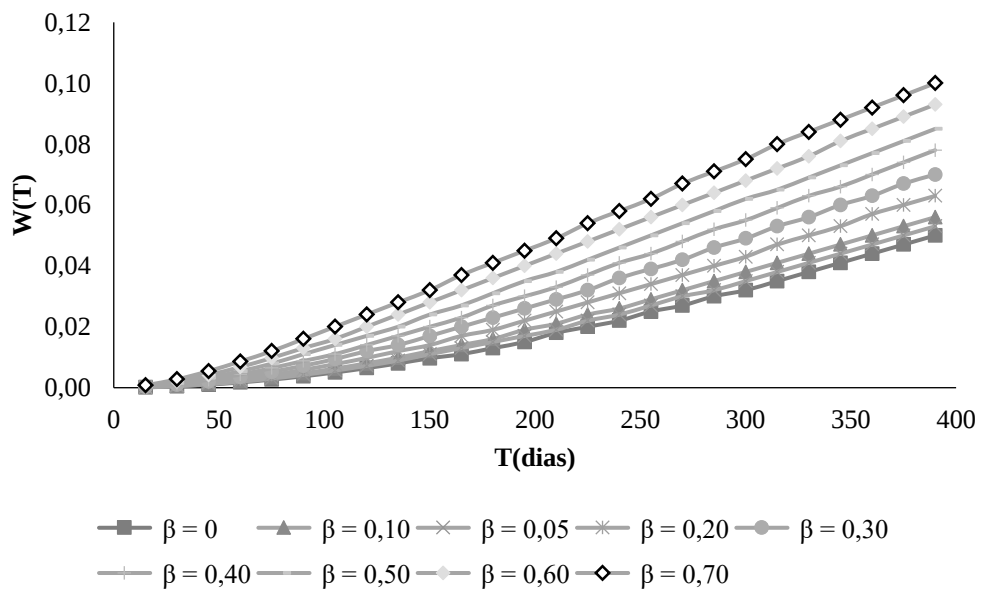
Através da análise de sensibilidade aplicada ao modelo, expressa na Tabela 12, pode-se observar a influência dos parâmetros nos resultados finais. Considerando que a principal contribuição do modelo proposto nesse trabalho é o fato de agregar a probabilidade de não ser detectado uma falha presente em uma inspeção (β), optou-se por variar mais vezes tal parâmetro. Os outros parâmetros foram analisados com uma variação de 20% em relação aos valores do caso base. Os Gráficos 4, 5 e 6 apresentam o impacto da variação do parâmetro β nos critérios. As recomendações concedidas por cada critério são analisadas e posteriormente, apresenta-se a recomendação mediante múltiplos critérios.

O Gráfico 4 apresenta o comportamento do modelo para a função $C(T)$.

Gráfico 4 - Sensibilidade da função $C(T)$ quando β varia

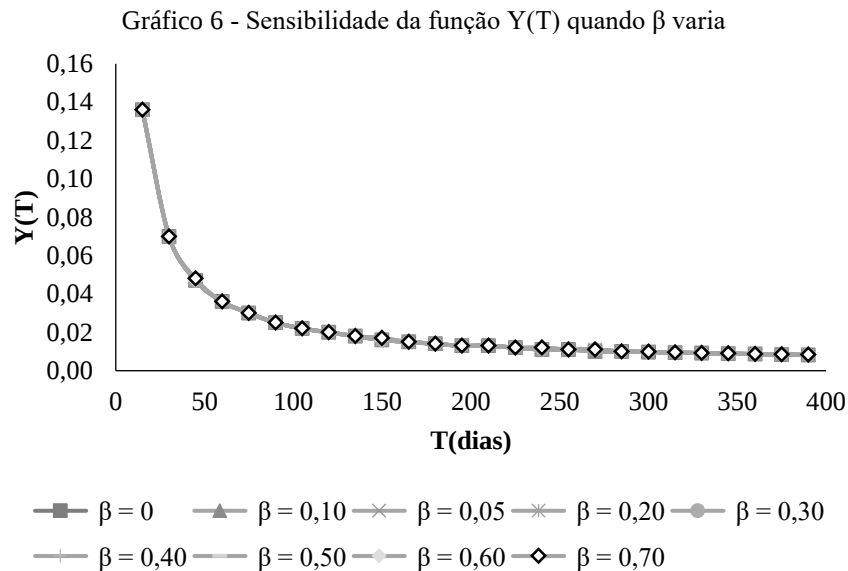
Fonte: O Autor (2020).

À medida que a probabilidade de ocorrer um falso negativo (β) aumenta, o $C(T)$ de um ciclo de renovação também aumenta. O aumento se dá pelo fato de que ocorrerão mais erros de julgamento por parte do inspetor. Nesse viés, se o decisor fosse levar em consideração apenas os custos envolvidos, esse critério recomendaria – à medida que ocorre seu crescimento – que as inspeções fossem mais rotineiras.

Gráfico 5 - Sensibilidade da função $W(T)$ quando β varia

Fonte: O Autor (2020).

Conforme o Gráfico 5, o $W(T)$ de um ciclo de renovação também aumenta à medida que o parâmetro β cresce. Esse segundo critério permanece recomendando realizar inspeções a cada 15 unidades de tempo, pois é o instante em que apresenta-se uma maior disponibilidade.



Fonte: O Autor (2020).

De forma oposta ao *downtime*, o critério $Y(T)$ sugere realizar inspeções a cada 390 unidades de tempo, pois mesmo que a elevação do parâmetro β aumente o número médio de membros na equipe em cada ciclo de renovação, esse número permanece mínimo em $T=390$, como visto no Gráfico 6. Percebe-se, portanto, que além do comportamento dos gráficos para os três critérios continuarem apresentando uma mesma tendência com a variação do β , os valores permanecem bem perto dos resultados alcançados com o parâmetro original.

Agora, diante de uma abordagem multicritério e expressando resultados mais completos, a Tabela 12 destaca os principais resultados obtidos com a variação de todos os outros parâmetros, além do β .

Tabela 12 - Análise de sensibilidade

Parâmetros do modelo													Melhores valores						
Caso	β	ca	μ	Ci	Cr	Cf	Ei	Er	Ef	Be	η	λ	C(T)*	T	W(T)*	T	Y(T)*	T	T (FITradeoff)
1 (Caso base)	0.10	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.2050	135	1.510E-04	15	8.204E-03	390	105
2	0.00	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.1920	135	1.144E-04	15	8.192E-03	390	105
3	0.05	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.199	135	1.318E-04	15	8.198E-03	390	105
4	0.20	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.219	120	1.961E-04	15	8.216E-03	390	105
5	0.30	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.233	120	2.529E-04	15	8.228E-03	390	105
6	0.40	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.249	105	3.268E-04	15	8.240E-03	390	90
7	0.50	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.265	105	4.268E-04	15	8.253E-03	390	90
8	0.60	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.285	90 e 105	5.696E-04	15	8.266E-03	390	90
9	0.70	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.306	90	7.904E-04	15	8.279E-03	390	75
10	0.10	320	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.192	135 e 150	1.510E-04	15	8.204E-03	390	105
11	0.10	480	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.217	120	1.510E-04	15	8.204E-03	390	105
12	0.10	400	4/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.192	135 e 150	1.510E-04	15	8.204E-03	390	105
13	0.10	400	6/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.217	120	1.510E-04	15	8.204E-03	390	105
18	0.10	400	5/300	12	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.181	120	1.510E-04	15	8.204E-03	390	105
19	0.10	400	5/300	18	25	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.228	135 e 150	1.510E-04	15	8.204E-03	390	105
20	0.10	400	5/300	15	20	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.202	135	1.510E-04	15	8.204E-03	390	105
21	0.10	400	5/300	15	30	60	2	3	5	3	1200	1/300	0.209	135	1.510E-04	15	8.204E-03	390	105
22	0.10	400	5/300	15	25	48	2	3	5	3	1200	1/300	0.203	135	1.510E-04	15	8.204E-03	390	105
23	0.10	400	5/300	15	25	72	2	3	5	3	1200	1/300	0.208	135	1.510E-04	15	8.204E-03	390	105
24	0.10	400	5/300	15	25	60	1.6	3	5	3	1200	1/300	0.205	135	1.510E-04	15	7.178E-03	390	105
25	0.10	400	5/300	15	25	60	2.4	3	5	3	1200	1/300	0.205	135	1.510E-04	15	9.229E-03	390	105
26	0.10	400	5/300	15	25	60	2	2.4	5	3	1200	1/300	0.205	135	1.510E-04	15	7.963E-03	390	105
27	0.10	400	5/300	15	25	60	2	3.6	5	3	1200	1/300	0.205	135	1.510E-04	15	8.445E-03	390	105
28	0.10	400	5/300	15	25	60	2	3	4	3	1200	1/300	0.205	135	1.510E-04	15	7.830E-03	390	105
29	0.10	400	5/300	15	25	60	2	3	6	3	1200	1/300	0.205	135	1.510E-04	15	8.578E-03	390	105
30	0.10	400	5/300	15	25	60	2	3	5	2.4	1200	1/300	0.206	135	1.522E-04	15	8.223E-03	390	105
31	0.10	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3.6	1200	1/300	0.205	135	1.497E-04	15	8.181E-03	390	105
32	0.10	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	960	1/300	0.225	120	1.884E-04	15	8.817E-03	390	105
33	0.10	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1440	1/300	0.191	135 e 150	1.261E-04	15	7.765E-03	390	105
34	0.10	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	0.8/300	0.193	135 e 150	1.213E-04	15	8.101E-03	390	105
35	0.10	400	5/300	15	25	60	2	3	5	3	1200	1.2/300	0.216	120	1.805E-04	15	8.290E-03	390	105

Fonte: O Autor (2020).

Dois parâmetros apresentam uma mesma característica, sendo eles: custo por uma demanda não atendida (ca) e o número de demandas (μ). Quando ocorre um crescimento nesses parâmetros, também recomenda-se inspeções com intervalos menores – considerando apenas $C(T)$ –, elevando-se os custos, porém, não há nenhuma influência no *downtime* e nem no número de membros na equipe, já que os mesmos não se relacionam com essas variáveis.

Em relação aos custos envolvidos, quanto aumenta-se o custo de inspeção (C_i), o $C(T)$ aumenta, todavia recomenda-se inspeções com intervalos maiores. O $C(T)$ também aumenta para os custos de substituição preventiva (C_r) e de correção (C_f), todavia o intervalo de inspeção recomendado por esse critério não varia. Esses parâmetros também não influenciam o $W(T)$ e nem o $Y(T)$.

No que tange ao número de membros da equipe, quando ocorre um aumento no número de equipes para inspeção (E_i), substituição (E_r) e correção (E_f), o número total de equipes a cada ciclo de renovação também eleva-se. Porém, os intervalos recomendados para inspeção continuam possuindo o mesmo valor. Aqui, tanto o $C(T)$ quanto o $W(T)$ não são influenciados.

Ficou claro que quanto maior for o parâmetro de forma (βe) os três critérios tendem a reduzir os valores por cada ciclo de renovação, mas recomendam os mesmos intervalos para a ação do inspetor. Já para o parâmetro de escala (η), os valores mínimos dos critérios tendem a reduzir, mas enquanto o $C(T)$ recomenda inspeções com intervalos maiores, os outros dois critérios permanecem inalterados.

Por fim, um aumento na taxa do *delay time* (λ) eleva os valores mínimos dos três critérios. Aqui, $C(T)$ recomenda inspeções mais rotineiras, enquanto os outros critérios não sofrem modificações.

O mais impressionante é que, agora sob uma visão multicriterial, 88,24% aproximadamente das modificações não influenciaram a recomendação final obtida através do FITradeoff. Ou seja, em 30, das 34 modificações do caso base, é recomendado que os intervalos de manutenção tenham uma periodicidade de $T=105$ unidades de tempo. As outras quatro recomendações também encontram-se muito próximas desse valor. Isso significa que, mesmo com significativa variação empregada, a composição das melhores alternativas, aplicando a metodologia de resolução multicritério, continua a mesma. Portanto, é conclusiva a assertiva de que o modelo possui uma consistência adequada para estes parâmetros abordados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa dissertação colaborou sob o ponto de vista acadêmico à medida em que estruturou e realizou uma revisão bibliográfica acerca dos conceitos fundamentais de manutenção e suas políticas, bem como sobre os métodos *Delay Time* e FITradeoff, algo fundamental para subsidiar futuras pesquisas.

Além do mais, a investigação sobre as particularidades da manutenção em sistemas de prestação de serviços também é relevante, pois enfatiza a necessidade de modelos mais apropriados para o contexto de serviço, já que essa área ainda se encontra um pouco mais defasada em relação à realidade industrial, no que diz respeito a modelos de manutenção. O trabalho apresenta mais duas colaborações significativas: apresentou o modelo *delay time* para contextos em que podem ocorrer erros de julgamento durante as inspeções (falsos negativos) e verificou a efetividade da agregação do FITradeoff com o *delay time*, considerando uma problemática de ordenação.

Com esse intuito, particularidades do sistema foram amplamente discutidas, e assim, um modelo multicritério foi proposto dentro do contexto de manutenção de gasodutos, com o objetivo de alcançar a melhor política de inspeções das válvulas de bloqueio, levando em consideração múltiplos critérios, neste caso em específico: custo, *downtime* e o número de membros presente na equipe de manutenção, dedicados a realizarem ações de inspeção, reparo e correção.

O sistema de distribuição de gás natural foi utilizado para ilustrar a aplicabilidade do modelo e sua eficiência, chegando assim a resultados bastante satisfatórios, observando a grande importância da utilização de modelos multicritério para a escolha da melhor política de manutenção dentro do contexto de serviços, como já é aceito na produção de bens. Com a metodologia empregada, busca-se não mais uma solução ótima, posto que devido à existência de conflitos entre os objetivos, não se tem a possibilidade de se obter a otimização de todos os critérios simultaneamente.

Portanto, pôde-se alcançar alternativas com desempenhos mais equilibrados em termos dos critérios custo e *downtime*, juntamente com os membros atuantes na equipe de manutenibilidade, quando comparado com modelos que levam em conta um único critério. Assim, mostra-se que, na distribuição e fornecimento de gás, ou seja, na prestação do serviço, operações de manutenção não podem ser baseadas em apenas um único fator, pois se estaria beneficiando um aspecto dentro do sistema em detrimento de outro. Por exemplo, levando em

consideração apenas o fator custo, poder-se-ia obter graves consequências com relação ao *downtime* do sistema, pois, no intuito de minimizar o custo, menos inspeções são realizadas e falhas tendem a surgir, logo, a medida tomada seria totalmente ineficiente e negativa para os resultados globais.

5.1 Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Apesar do modelo desenvolvido ter sido aplicado com dados que de *input* que se aproximam da realidade, uma das principais limitações foi coletar dados de decisores nas indústrias, pois não se obteve sucesso ao contactar as empresas para o propósito deste estudo. Isso possibilitaria obter resultados ainda mais concisos com a realidade e permitiria expressar as preferências do tomador de decisão durante a aplicação do método FITradeoff.

No que concerne a realização de trabalhos futuros, sugere-se que sejam levados em considerações os tempos realizados para inspeção, reparo e correção, que impactarão diretamente no modelo. Além disso, em outro instante, recomenda-se avaliar o modelo mediante o efeito da oportunidade, já que, na medida em que a manutenção preventiva é explorada quando as oportunidades surgem, economiza-se tempo adicional porque a planta já cessou as operações por causa da indisponibilidade de alguns componentes.

De forma paralela, anseia-se que seja desenvolvido um Sistema de Apoio à Decisão (SAD), para que os profissionais de manutenção inseridos no mercado possam fazer o uso do modelo sem enaltecendo as dificuldades interpretativas dos modelos analíticos, já que, apesar de tais modelos estarem sendo aplicados em vários contextos, na maioria das vezes eles são abordados apenas por pesquisadores acadêmicos que consideram a manutenção como campo de estudo, pois em geral são modelos com uma forte estrutura axiomática, o que acaba induzindo os decisores das indústrias a não fazerem uso, seja porque não entendem os modelos matemáticos ou porque os mesmos carecem de um longo tempo de implantação.

Por fim, sob a perspectiva de decisão multicritério adotada nesta dissertação, recomenda-se que sejam observados mais critérios que possam expressar as preferências do decisor e que seja possível contactar o mesmo para este estudo. Ademais, em outro paradigma, sabe-se que na maioria das empresas de grande porte – como as de petróleo e gás – as decisões são tomadas por mais de um decisor e que nem sempre existe consenso entre os mesmos. Assim, propõe-se que sejam adotados modelos de decisão em grupo para tratar de problemas que envolva decisores com diferentes objetivos, responsabilidades e interesses.

REFERÊNCIAS

- ALBERTI, A. R.; CAVALCANTE, C. A.; SCARF, P.; SILVA, A. L. Modelling inspection and replacement quality for a protection system. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 176, p. 145-153, 2018.
- ALMEIDA, A. T.; ALENCAR, M. H.; GARCEZ, T. V.; FERREIRA, R. J. P. A systematic literature review of multicriteria and multi-objective models applied in risk management. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 28, n. 2, p. 153-184, 2017.
- ANTAKI, G. A. *Piping and pipeline engineering*. Design, Construction, Maintenance, Integrity and Repair. Aiken, South Carolina, U.S.A, 2003.
- BAHOOTOROODY, A.; ABAEI, M. M.; ARZAGHI, E.; BAHOOOTOROODY, F.; DE CARLO, F.; ABBASSI, R. Multi-level optimization of maintenance plan for natural gas system exposed to deterioration process. *Journal of Hazardous Materials*, v. 362, p. 412-423, 2019.
- BAUDRY, G.; MACHARIS, C.; VALLEE, T. Range-based multi-actor multi-criteria analysis: a combined method of multi-actor multi-criteria analysis and Monte Carlo simulation to support participatory decision making under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, v. 264, n. 1, p. 257-269, 2018.
- BEN-DAYA, M.; KUMAR, U.; MURTHY, D. N. P. *Introduction to maintenance engineering: modelling, optimization and management*. West Sussex, U.K: John Wiley & Sons, 2016.
- BERRADE, M. D.; CAVALCANTE, C. A.V.; SCARF, P. A. Maintenance scheduling of a protection system subject to imperfect inspection and replacement. *European Journal of Operational Research*, v. 218, n. 3, p. 716-725, 2012.
- BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A.V. Modelling imperfect inspection over a finite horizon. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 111, p. 18-29, 2013.
- BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A.V. Some insights into the effect of maintenance quality for a protection system. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 64, n. 2, p. 661-672, 2015.
- BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C.A.V. A study of postponed replacement in a delay time model. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 168, p. 70-79, 2017.
- BERRADE, M. D.; SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C.A.V. Conditional inspection and maintenance of a system with two interacting components. *European Journal of Operational Research*, v. 268, n. 2, p. 533-544, 2018.

BOUSDEKIS, A.; MAGOUTAS, B.; APOSTOLOU, D.; MENTZAS, G. A proactive decision making framework for condition-based maintenance. *Industrial Management & Data Systems*, v. 115, n. 7, p. 1225-1250, 2015.

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

CAVALCANTE, C. A. V.; SCARF, P. A.; ALMEIDA, A. T.; DE SILVA, C. A two-phase inspection policy for a single component preparedness system with a mixed time to failure distribution. In: *ESREL 2009*, Praga, 2009.

CAVALCANTE, C. A.V.; SCARF, P. A.; BERRADE, M. D. Imperfect inspection of a system with unrevealed failure and an unrevealed defective state. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 68, n. 2, p. 764-775, 2019.

CAVALCANTE, C.A.V; LOPES, R. S.; SCARF, P. A. A general inspection and opportunistic replacement policy for one-component systems of variable quality. *European Journal of Operational Research*, v. 266, n. 3, p. 911-919, 2018.

CHRISTER, A. H. Innovatory decision making. In: NATO CONFERENCE ON ROLE AND EFFECTIVENESS OF DECISION THEORY IN PRACTICE (Eds. Bowen, K. and White, D. J.), 1976, London. *Proc.[...]*. London: Hodder and Stoughton, 1976.

CHRISTER, A. H. Modelling inspection policies for building maintenance. *Journal of the Operational Research Society*, v. 33, n. 8, p. 723-732, 1982.

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

CHRISTER, A. H.; WALLER, W. M. Reducing production downtime using delay-time analysis. *Journal of the Operational Research Society*, v. 35, n. 6, p. 499-512, 1984b.

CUI, X. *Delay time modelling and software development*. 2002. Tese (Doutorado) - University of Salford, Salford, UK , 2002.

CULLUM, J.; BINNS, J.; LONSDALE, M.; ABBASSI, R.; GARANIYA, V. Risk-Based Maintenance Scheduling with application to naval vessels and ships. *Ocean Engineering*, v. 148, p. 476-485, 2018.

DA SILVA, J. G.; LOPES, R. S. An integrated framework for mode failure analysis, delay time model and multi-criteria decision-making for determination of inspection intervals in complex systems. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 51, p. 17-28, 2018.

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*. International Series in Operations Research & Management Science: v. 231, New York: Springer, 2015.

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*, v. 250, n. 1, p. 179-191, 2016.

DE ALMEIDA, A. T.; GEIGER, M. J.; MORAIS, D. C. Challenges in multicriteria decision methods. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 29, p. 247–252, 2018.

DE ALMEIDA, A. T.; MORAIS, D. C.; NURMI, H. *Systems, Procedures and Voting Rules in Context: A Primer for Voting Rule Selection*. 1. ed. Springer Nature, 2019.

DE FARIA JR, H.; COSTA, J. G. S.; OLIVAS, J. L. M. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 46, p. 201-209, 2015.

DE JONGE, B.; DIJKSTRA, A. S.; ROMEIJNDERS, W. Cost benefits of postponing time-based maintenance under lifetime distribution uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 140, p. 15-21, 2015.

DELL'OVO, M.; FREJ, E. A.; OPPIO, A.; CAPOLONGO, S.; MORAIS, D. C.; DE ALMEIDA, A. T. Multicriteria decision making for healthcare facilities location with visualization based on FITradeoff method. In: International Conference on Decision Support System Technology. Springer, Cham, 2017. p. 32-44.

DER MAUER, M. A.; BEHRENS, T.; DERA KHSHANMANESH, M.; HANSEN, C.; MUDERACK, S. Applying Sound-Based Analysis at Porsche Production: Towards Predictive Maintenance of Production Machines Using Deep Learning and Internet-of-Things Technology. In: *Digitalization Cases*. Springer, Cham, 2019. p. 79-97.

DINIS, D.; BARBOSA-PÓVOA, A.; TEIXEIRA, A. P. Valuing data in aircraft maintenance through big data analytics: A probabilistic approach for capacity planning using Bayesian networks. *Computers & Industrial Engineering*, v. 128, p. 920-936, 2019.

DO, P.; ASSAF, R.; SCARF, P.; IUNG, B. Modelling and application of condition-based maintenance for a two-component system with stochastic and economic dependencies. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 182, p. 86-97, 2019.

DO, P.; VOISIN, A.; LEVRAT, E.; IUNG, B. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 133, p. 22-32, 2015.

DRIESSEN, J. P. C.; PENG, Hao; VAN HOUTUM, G. J. Maintenance optimization under non-constant probabilities of imperfect inspections. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 165, p. 115-123, 2017.

DUNN, Sandy. The fourth generation of maintenance. In: *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE OF MAINTENANCE SOCIETIES (ICOMS 2003)*, p. 11, Perth, Australia, 2003.

ERKOYUNCU, J. A.; KHAN, S.; EIROA, A. L.; BUTLER, N.; RUSHTON, K.; BROCKLEBANK, S. Perspectives on trading cost and availability for corrective maintenance at the equipment type level. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 168, p. 53-69, 2017.

FERREIRA, L. L.; ALBANO, M.; SILVA, J.; MARTINHO, D.; MARREIROS, G.; DI ORIO, G.; MALÓ, P. FERREIRA, H. A pilot for proactive maintenance in industry 4.0. In: *2017 IEEE 13TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON FACTORY COMMUNICATION SYSTEMS (WFCS)*. Trondheim, Norway. IEEE, 2017. p. 1-9.

FERREIRA, R. J. P.; DE ALMEIDA, A. T.; CAVALCANTE, C. A. V. A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 94, n. 5, p. 905-912, 2009.

FLAGE, R. A delay time model with imperfect and failure-inducing inspections. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 124, p. 1-12, 2014.

FLEISCHMANN, H.; KOHL, J.; FRANKE, J.; REIDT, A.; DUCHON, M.; KRCMAR, H. Improving maintenance processes with distributed monitoring systems. In: *2016 IEEE 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INFORMATICS (INDIN)*. Poitiers, France. IEEE, 2016. p. 377-382.

FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. Using data visualization for ranking alternatives with partial information and interactive tradeoff elicitation. *Operational Research*, v. 19, n. 4, p. 909-931, 2019.

GONÇALVES, C. D. F.; DIAS, J. A. M.; MACHADO, V. A. C. Multi-criteria decision methodology for selecting maintenance key performance indicators. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, v. 10, n. 3, p. 215-223, 2015.

GUARNIERI, P. Synthesis of main criteria, methods and issues of multicriteria supplier selection. *Revista de Administração Contemporânea*, v. 19, n. 1, p. 1-25, 2015.

GUSMÃO, A. P. H.; MEDEIROS, C. P. A model for selecting a strategic information system using the FITradeoff. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2016, 2016.

HABES, M.; SALLOUM, S. A.; ALGHIZZAWI, M.; ALSHIBLY, M. S. The role of modern media technology in improving collaborative learning of students in Jordanian universities. *International Journal of Information Technology and Language Studies*, v. 2, n. 3, 2018.

HAN, Z. Y.; WENG, W. G. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. *Journal of hazardous materials*, v. 189, n. 1-2, p. 509-518, 2011.

HENG, A.; ZHANG, S.; TAN, A. C.; MATHEW, J. Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities. *Mechanical systems and signal processing*, v. 23, n. 3, p. 724-739, 2009.

- JASIULEWICZ-KACZMAREK, M. ISO 9000:2015 quality management principles as the framework for a maintenance management system. *Scientific Journals of Poznan University of Technology Series Of Organization and Management*, Poznan, Poland, v. 69, 2016.
- JIA, X.; CHRISTER, A. H. A periodic testing model for a preparedness system with a defective state. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 13, n. 1, p. 39-49, 2002.
- KANG, T. H. A.; SOARES JR., A. M. C.; DE ALMEIDA, A. T. Evaluating electric power generation technologies: A multicriteria analysis based on the FITradeoff method. *Energy*, v. 165, p. 10-20, 2018.
- KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Cambridge & New York, Cambridge University Press, 1993, 569 p.
- KEENEY, R.L.; RAIFFA, H. *Decision analysis with multiple conflicting objectives*. Wiley & Sons, New York, 1976.
- KUMAR, U.; GALAR, D. Maintenance in the era of Industry 4.0: issues and challenges. In: *Quality, IT and Business Operations*. Springer, Singapore, 2018. p. 231-250.
- LEE, H.; CHA, J. H. New stochastic models for preventive maintenance and maintenance optimization. *European Journal of Operational Research*, v. 255, n. 1, p. 80-90, 2016.
- LI, Z.; WANG, Y.; WANG, K. Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers: Industry 4.0 scenario. *Advances in Manufacturing*, v. 5, n. 4, p. 377-387, 2017.
- LIU, X.; ZHENG, J.; FU, J.; JI, J.; CHEN, G. Multi-level optimization of maintenance plan for natural gas pipeline systems subject to external corrosion. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 50, p. 64-73, 2018.
- MA, L.; CHENG, L.; LI, M. Quantitative risk analysis of urban natural gas pipeline networks using geographical information systems. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 26, n. 6, p. 1183-1192, 2013.
- MACHONA, L.; CHIKODZI, D.; SITHOLE, N. Water Quality Analysis for Springs in Bvumba Catchment Area, Manicaland Province, Zimbabwe. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, p. 1-13, 2017.
- MAHMOUDZADEH, M.; SEYFI, A. The Effect of Product Market Competition on the Relationship between Capital Structure and Financial Performance of Companies. *International Journal of Economics and Financial Issues*, v. 7, n. 3, p. 523-526, 2017.
- MANICKAM, L. R. A. *Proposal for the Fourth Generation of Maintenance and the Future Trends & Challenges in Production*. 2012. 76 f. Dissertação (Master degree Programme - Product and process development – Production and Logistics). Mälardalen University. Suécia, 2012.

- MILLER, W. Understanding grounded theory. *Clinical Laboratory Science*, v. 28, n. 3, p. 197-200, 2015.
- MOSTAFA, S.; DUMRAK, J.; SOLTAN, H. Lean maintenance roadmap. *Procedia Manufacturing*, v. 2, p. 434-444, 2015.
- MOUBRAY, J. *Reliability-centered maintenance*. 2. ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.
- MOURTZIS, D.; VLACHOU, E. A cloud-based cyber-physical system for adaptive shop-floor scheduling and condition-based maintenance. *Journal of manufacturing systems*, v. 47, p. 179-198, 2018.
- NAZEMI, E.; SHAHANAGHI, K. Developing an inspection optimization model based on the delay-time concept. *Journal of Industrial Engineering*, v. 2015, 2015.
- PINTELON, L.; PARODI-HERZ, A. Maintenance: an evolutionary perspective. In: *Complex system maintenance handbook*. Springer, London, 2008. p. 21-48.
- ROSELLI, L. R. P.; FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T. Neuroscience experiment for graphical visualization in the FITradeoff decision support system. In: *International Conference on Group Decision and Negotiation*. Springer, Cham, 2018. p. 56-69.
- ROY, B. *Multicriteria methodology for decision aiding*. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- RUPARATHNA, R.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. Multi-period maintenance planning for public buildings: A risk based approach for climate conscious operation. *Journal of Cleaner Production*, v. 170, p. 1338-1353, 2018.
- SARAÇ, C. A Proposal of "Applied Social Activities" Module for Undergraduate Program of Turkish Language and Literature Teachers: A Qualitative Study. *Educational Sciences: Theory and Practice*, v. 11, n. 3, p. 1520-1529, 2011.
- SARI, E.; SHAHAROUN, A. M.; MA'ARAM, A.; YAZID, A. M. Sustainable maintenance performance measures: a pilot survey in Malaysian automotive companies. *Procedia CIRP*, v. 26, p. 443-448, 2015.
- SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A. V. Mixed maintenance policies for mixed items. In: *OR50 Annual Conference, 2008, York*. OR50 Annual Conference. UK, York, 2008.
- SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A.; DWIGHT, R. A.; GORDON, P. An age-based inspection and replacement policy for heterogeneous components. *IEEE Transactions on reliability*, v. 58, n. 4, p. 641-648, 2009.
- SCHOLTEN, K.; DE BLOK, C.; HAAR, R. How flexibility accommodates demand variability in a service chain: insights from exploratory interviews in the refugee supply chain. In: *THE PALGRAVE HANDBOOK OF HUMANITARIAN LOGISTICS AND SUPPLY CHAIN MANAGEMENT*. Palgrave Macmillan, London, 2018. p. 359-393.

SCURATI, G. W.; GATTULLO, M.; FIORENTINO, M.; FERRISE, F.; BORDEGONI, M.; UVA, A. E. Converting maintenance actions into standard symbols for Augmented Reality applications in Industry 4.0. *Computers in Industry*, v. 98, p. 68-79, 2018.

SELCUK, S. Predictive maintenance, its implementation and latest trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 231, n. 9, p. 1670-1679, 2016.

SHIN, J.; JUN, H. On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*, v. 2, n. 2, p. 119-127, 2015.

SINGH, G.; KUMAR, T. C. A.; NAIKAN, V. N. A. Efficiency monitoring as a strategy for cost effective maintenance of induction motors for minimizing carbon emission and energy consumption. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 184, p. 193-201, 2019.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. *Operations management*. Pearson, 2013.

SPENDLA, L.; KEBISEK, M.; TANUSKA, P.; HRCKA, L. Concept of predictive maintenance of production systems in accordance with industry 4.0. In: *2017 IEEE 15TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLIED MACHINE INTELLIGENCE AND INFORMATICS (SAMI)*. Herl'any, Slovakia. IEEE, 2017. p. 000405-000410.

STÅLHANE, M.; VEFSNMO, H.; HALVORSEN-WEARE, E. E.; HVATTUM, L. M.; NONÅS, L. M. Vessel fleet optimization for maintenance operations at offshore wind farms under uncertainty. *Energy Procedia*, v. 94, p. 357-366, 2016.

STEWART, M. *Surface Production Operations: Volume III: Facility Piping and Pipeline Systems*. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2015.

WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L. A framework for maintenance concept development. *International journal of production economics*, v. 77, n. 3, p. 299-313, 2002.

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

WANG, W. Delay time modelling. In: *Complex system maintenance handbook*. Springer, London, 2008. p. 345-370.

WANG, W. Models of inspection, routine service, and replacement for a serviceable one-component system. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 116, p. 57-63, 2013.

WAZLAWICK, R. S. Reflections about Research in Computer Science regarding the Classification of Sciences and the Scientific Method. *Revista de Sistemas de Informação da FSMA*, v. 6, p. 3-10, 2010.

WU, S.; COOLEN, F. P.; LIU, B. Optimization of maintenance policy under parameter uncertainty using portfolio theory. *IIE Transactions*, v. 49, n. 7, p. 711-721, 2017.

XU, L.D.; XU, E.L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018.

YANG, L.; YE, Z. S.; LEE, C. G.; YANG, S. F.; PENG, R. A two-phase preventive maintenance policy considering imperfect repair and postponed replacement. *European Journal of Operational Research*, v. 274, n. 3, p. 966-977, 2019.

YANG, L.; ZHAO, Y.; PENG, R.; MA, X. Hybrid preventive maintenance of competing failures under random environment. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 174, p. 130-140, 2018.

YIN, R. K. *Case study research and applications: Design and methods*. 6. ed. Sage publications, 2017.

YLIPÄÄ, T.; SKOOGH, A.; BOKRANTZ, J.; GOPALAKRISHNAN, M. Identification of maintenance improvement potential using OEE assessment. *International Journal of Productivity and Performance Management*, v. 66, n. 1, p. 126-143, 2017.

ZHANG, S.; ZHOU, W. Cost-based optimal maintenance decisions for corroding natural gas pipelines based on stochastic degradation models. *Engineering Structures*, v. 74, p. 74-85, 2014.

ZHAO, Q.; HAN, L. D.; LUO, N. A proposed semi-quantitative framework for comprehensive risk assessment of urban hazard installations considering rescue accessibility and evacuation vulnerability. *Safety science*, v. 110, p. 192-203, 2018.

ZHAO, Y.; SONG, M. Failure analysis of a natural gas pipeline. *Engineering Failure Analysis*, v. 63, p. 61-71, 2016.

ZHENG, Z.; ZHOU, W.; ZHENG, Y.; WU, Y. Optimal maintenance policy for a system with preventive repair and two types of failures. *Computers & Industrial Engineering*, v. 98, p. 102-112, 2016.