

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

**Política de Inspeção em Sistemas Complexos: Uma abordagem
Híbrida do *Delay-time* com FMEA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR

JULIANNA GOMES DA SILVA
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sampaio Lopes

CARUARU, 2017

JULIANNA GOMES DA SILVA

**“POLÍTICA DE INSPEÇÃO EM SISTEMAS COMPLEXOS:
UMA ABORDAGEM HÍBRIDA DO DELAY-TIME COM
FMEA”**

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 do Centro Acadêmico do Agreste (Área de Concentração: Otimização e Gestão da Produção).

Orientador(a): Rodrigo Sampaio Lopes, Doutor.

Caruaru

2017

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Marcela Porfírio CRB/4 - 1878

S586p Silva, Julianna Gomes da.
Política de inspeção em sistemas complexos : uma abordagem híbrida do Delay-time com FMEA. / Julianna Gomes da Silva. – 2017.
92f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Rodrigo Sampaio Lopes.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2017.
Inclui Referências.

1. Manutenção. 2. Inspeção de produtos. 3. Processo decisório por critério múltiplo.
I. Lopes, Rodrigo Sampaio (Orientador). II. Título.

658.5 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2017-062)

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

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

JULIANNA GOMES DA SILVA

**“Política de Inspeção em Sistemas Complexos: Uma abordagem Híbrida do
Delay-time com FMEA”**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OTIMIZAÇÃO E GESTÃO DA PRODUÇÃO

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

Caruaru, 21 de Fevereiro de 2017.

Prof. RODRIGO SAMPAIO LOPES, DOUTOR (UFPE)

Prof. MARCELO HAZIN ALENCAR, DOUTOR (UFPE)

Prof. RODRIGO JOSÉ PIRES FERREIRA, DOUTOR (INSTITUIÇÃO)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter sempre me guiado e estado comigo em todos os momentos bons e ruins da minha formação e vida. Agradeço aos meus pais, Ronaldo e Josenilda por todo esforço, apoio, conselhos, orações e por servirem de inspiração em todos os momentos. Agradeço aos meus irmãos Renan e Romney por toda a confiança, companheirismo, por sempre apoiarem minhas decisões, incentivarem sempre meu crescimento profissional. Agradeço também a meu esposo Manoel Figueira por estar sempre do meu lado com sua paciência, apoio e amor em todos os momentos. Agradeço a minha tia/madrinha Josivanda, por me apoiar desde muito pequena. Agradeço a todos os meus amigos, em especial aquelas que fizeram parte de boa parte dos meus caminhos até o dia de hoje, vocês formaram comigo a base de todo o aprendizado. Agradeço a banca examinadora por todas as contribuições. Por fim, agradeço aos professores e funcionários da Pós Graduação de Engenharia de Produção da UFPE-CAA por todo o conhecimento compartilhado, em particular ao meu orientador Rodrigo Sampaio, pelo apoio e pela experiência transmitida o que serviu e servirá de exemplo para minha busca de crescimento profissional. Pela paciência e cobranças que foram tão necessárias para que eu chegasse até aqui. Agradeço também a FACEPE pelo apoio financeiro.

RESUMO

Esta dissertação tem por objetivo propor um método para definição de uma política de inspeção com três principais elementos: a avaliação dos modos de falha (MF) de um sistema, seleção dos critérios que melhor representam cada dimensão dos modos de falha e o processo de determinar o melhor intervalo para as inspeções através de uma abordagem multicritério. A modelagem proposta consiste em determinar o intervalo de inspeção para cada modo de falha, considerando que os MF têm consequências em diferentes critérios. Para atender a este objetivo, primeiramente, o sistema e os seus respectivos modos de falha são identificados; em seguida, as consequências dos MF são classificadas de acordo com um diagrama lógico de decisão que auxilia o decisor a identificar os critérios a serem utilizados na modelagem, selecionando o(s) critérios que melhor representam cada modo de falha, para este fim foram propostos seis diferentes critérios custo, *downtime*, reputação, impacto ambiental, saúde e segurança e qualidade. Por fim, os intervalos de inspeção são determinados para cada MF através de uma análise MCDA (*Multiple-Criteria Decision Analysis*) através do método PROMETHEE II. Através da aplicação do modelo proposto em um subsistema de uma usina termoelétrica foi possível determinar o intervalo de inspeção para cada modo de falha e introduzir uma visão ampla do problema de decisão, concentrando a atenção para os modos de falha que incorrem em maiores impactos.

Palavras-chaves: Manutenção. Delay-time. Multicritério.

ABSTRACT

This dissertation aims to propose a method to define an inspection policy with three main elements: The evaluation of failure modes (FM) of a system, selection of criteria that best represent each dimension of failure modes, and the process of determining the optimum interval for inspections through a multicriteria approach. The proposed modeling consists in determining the inspection interval for each failure mode, considering that the FM has consequences in different criteria. To meet this goal, first, the system and its respective failure modes are identified; then, the consequences of the FM are classified according to a logical decision diagram that assists the decision maker to identify the criteria to be used in the modeling selecting them the one(s) that best represent each failure mode, to this finality were proposed six different criteria cost, downtime, reputation, environmental impact, health and safety and quality. Finally, the inspection intervals are determined for each FM through an MCDA analysis (Multiple-Criteria Decision Analysis) through the PROMETHEE II method. By applying the methodology proposed in a subsystem of a thermoelectric plant it was possible to determine the inspection interval for each failure mode. Through the proposed model, it was possible to introduce a broad view of the decision problem and to focus attention on the failure modes that incur greater impacts.

Keywords: Maintenance. Delay-time. Multicriteria.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Metodologia do trabalho	13
Figura 2.1 – Delay-Time	28
Figura 2.2 - Utilidade do conceito delay-time.....	29
Figura 3.1 - Número de artigos publicados por período até 2016	38
Figura 3.2 - Distribuição de interseção dos critérios usados com Delay-time	40
Figura 4.1 – Framework proposto	45
Figura 4.2 – Diagrama Lógico para selecionar quais critérios	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Classificação das referências de acordo com os critérios de otimização.....	36
Tabela 3.2- Distribuição dos critérios	39
Tabela 4.1 – Impacto na reputação	51
Tabela 4.2 - Índices de impacto ambiental	53
Tabela 4.3- Fator relativo à quantidade de tempo necessário para limpar um acidente ambiental ocasionado por uma falha	54
Tabela 4.4 – Mensuração da qualidade percebida.....	55
Tabela 4.5 – Impactos a saúde e segurança do trabalhador.....	56
Tabela 5.1 - Critérios utilizados na otimização da Manutenção de Usinas Geradoras	61
Tabela 5.2 – Modos de falha	63
Tabela 5.3– Respostas diagrama Lógico	68
Tabela 5.4 – Parâmetros	69
Tabela 5.5 – Melhor tempo de cada critério para cada MF.....	70
Tabela 5.6 – Pesos ROC – Cenário 0	71
Tabela 5.7- Melhor alternativa para cada modo de falha	72
Tabela 5.8 – Pesos Cenário 1	74
Tabela 5.9 – Pesos Cenário 2	74
Tabela 5.10 – Pesos Cenário 3.....	75
Tabela 5.11 – Pesos Cenário 4.....	75
Tabela 5.12 – Análise de Sensibilidade dos pesos	76

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1Objetivos do trabalho.....	12
1.1.1Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivo Específico	12
1.2 Metodologia.....	12
1.3 Estrutura da Dissertação	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 Função Manutenção	15
2.2 Estratégias de Manutenção.....	16
2.2.1 Manutenção Corretiva	16
2.2.2 Manutenção Preventiva	17
2.3 Políticas de inspeção	17
2.4 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA).....	18
2.5 Sistemas Complexos	19
2.6.Métodos Multicritério de Apoio a Decisão (MCDA).....	21
2.6.1. PROMETHEE II	23
2.7 Conceito <i>Delay-time</i>	27
2.8 Considerações finais do capítulo 2	30
3. ANÁLISE DA LITERATURA - DELAY-TIME	31
3.1 Análise dos critérios utilizados na literatura dos modelos <i>delay-time</i>	31
3.1.1 Aplicação de Modelos <i>Delay-time</i>	31
3.1.2 Distribuição de publicações.....	37
3.1.3. Critérios de decisão utilizados nos modelos <i>delay-time</i>	38
3.2 Considerações finais do capítulo 3	41
4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO	42
4.1 Desenvolvimento do Modelo de inspeção – Um modelo híbrido entre o <i>Delay-time</i> e o FMEA	42
4.1.1 O <i>framework</i> proposto.....	44
4.2 Considerações finais do capítulo 4	58

5. APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO EM UMA USINA TERMOELÉTRICA	
59	
5.1 Contextualização das decisões de manutenção em uma usina termoeétrica.....	59
5.2 Aplicação do Framework Proposto	61
5.3 Considerações finais do capítulo 5	77
6. CONCLUSÕES	79
7. REFERÊNCIAS	81

1. INTRODUÇÃO

Para alguns sistemas, é extremamente importante mitigar falhas durante a operação, pois estas podem ter consequências muito perigosas ou desastrosas. Portanto, assim como afirma Wang (2002) a manutenção sobre eles é necessária uma vez que pode melhorar a confiabilidade. Com o intuito de melhorar a confiabilidade do sistema, prevenir a ocorrência de falhas do sistema e reduzir os custos de manutenção, as políticas de manutenção preventivas vêm sendo amplamente discutidas na literatura nas últimas décadas. A exemplo de Barlow & Proschan (1965), Barlow & Proschan (1975) Nakagawa & Osaki (1976), Berg & Epstein (1978), Hastings & Jardine (1979), Aven (1984), Cho & Parlar (1991), Okumura et al.(1996), Dekker (1996), Wang & Christer (2003), Nicolai & Dekker (2007), Sullivan et al. (2010), Nguyen et al. (2015) e Jia et al. (2016).

Wang (2012) ao falar sobre as políticas de manutenção preventiva acrescenta que para qualquer programa de manutenção preventiva, a inspeção é sempre uma atividade necessária, uma vez que fornece informações sobre o estado do sistema/componente para facilitar a determinação e execução das decisões de reparo e substituição. Assim, uma decisão adicional relacionada ao plano de inspeção associada com a manutenção deve ser feita.

Com o intuito de justificar que a inspeção é uma parte essencial da manutenção preventiva, Christer (1976) propôs o conceito *delay-time*¹. Este considera que a falha de um item ocorre como um processo de duas fases, a primeira vai a partir do ponto inicial para um ponto em que um defeito pode ser identificado pela primeira vez por uma inspeção, e, a segunda, na qual a partir desse ponto este defeito se transforma em uma falha. O tempo entre o qual defeito é identificável e quando ocorre à falha é chamado de *delay-time*. Assim este *delay-time* é uma oportunidade para inspeção onde o defeito pode ser identificado e removido. Sendo assim o problema de decisão nestes casos consiste em encontrar o melhor intervalo entre inspeções considerando a existência do *delay-time*. O interesse sobre este conceito vem aumentando com o decorrer dos anos, como demonstrado no capítulo 3.

¹ Este termo será utilizado em inglês nesta dissertação, por não ter nenhuma palavra em português que represente a essência da mesma.

Várias modificações do modelo originalmente proposto por Christer (1976) foram apresentadas, a exemplo de Attia (1997), Christer et al. (2001), Aven & Castro (2009), Cunningham et al. (2011), van Oosterom (2014), Flage (2014), Lopes et al. (2015), Nazemi & Shahanaghi (2015), Emovon et al. (2016), Shi et al. (2016), Yang et al. (2016) entre outros. Entretanto como destaca Andrawus (2008) uma área pouco explorada dentre as aplicações do *delay-time* é a qual o sistema complexo pode ser agrupado de acordo com os seus modos de falha.

Neste sentido, surgiu à necessidade de se explorar as lacunas anteriormente discutidas e estas foram o foco desta dissertação. Para tanto foi desenvolvido uma metodologia para a construção de um modelo que utiliza um modelo de inspeção *delay-time* em conjunto com os métodos de decisão multicritério e a abordagem qualitativa FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*).

1.1 Objetivos do trabalho

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é construir um modelo de inspeção para sistemas complexos que leve em consideração os diferentes modos de falha e a preferências do decisor.

1.1.2 Objetivo Específico

Tem-se, portanto, como objetivos específicos desta dissertação:

- Construir um modelo de inspeção para sistemas complexos que leve em consideração os diferentes modos de falha e as técnicas multicritério de apoio a decisão;
- Modelar este problema em um contexto específico;
- Realizar experimentos numéricos do modelo para propor o melhor intervalo entre inspeções e para verificar a aplicabilidade do modelo;
- Validar o modelo aplicado através de uma análise de sensibilidade.

1.2 Metodologia

A metodologia utilizada teve como base uma metodologia proposta por Mitroff et al. (1974) bastante utilizada na literatura conforme Oliveira et al. (2016), Kolfshoten et al.

(2014), Eng-Larsson & Norrman (2014), Martinez et al. (2013), Trentin (2011). Esta metodologia é representada na Figura 1.1 composta por quatro principais bases: o modelo conceitual, o modelo científico, a solução e a realidade.

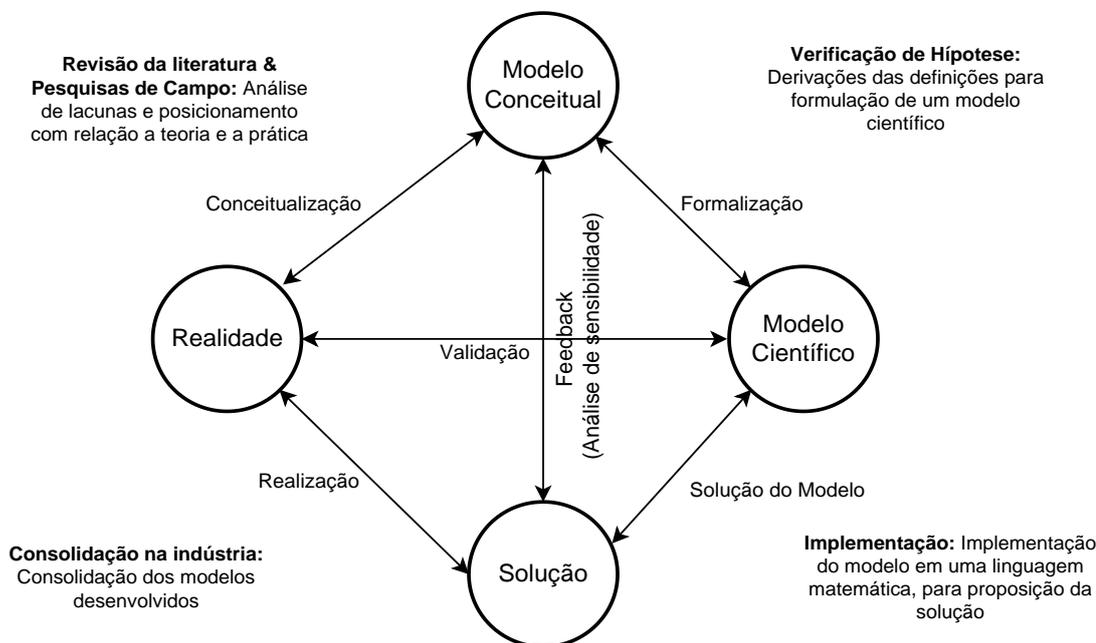


Figura 1.1 - Metodologia do trabalho

Fonte: Adaptado de Mitroff et al. (1974)

Para consolidar da primeira base do método, o modelo conceitual, primeiramente será realizado uma revisão bibliográfica, onde serão encontrados os conceitos relevantes para o entendimento do problema. Nesta etapa de conceitualização serão descritos os conceitos da função manutenção, das principais estratégias de manutenção (preventiva e corretiva), assim como também sobre as políticas de inspeção, o FMEA e também sobre as principais ferramentas de apoio a decisão. Ainda nesta etapa de conceitualização será descrito o conceito *delay-time* e uma análise da literatura sobre este tema com o intuito de identificar as principais lacunas para que elas possam ser exploradas no modelo conceitual.

Para construção do modelo conceitual, também será de fundamental importância o posicionamento da teoria com relação à realidade e serão realizadas pesquisas no intuito de verificar a utilidade do modelo conceitual. Esta fase da pesquisa será realizada em uma usina termoelétrica.

Uma vez definido o modelo conceitual, a formalização se dará por meio de uma modelagem do problema de decisão. Para tal serão utilizados como base todos os conceitos abordados na etapa anterior, sempre verificando a relação das variáveis definidas com o

modelo conceitual. No modelo conceitual serão descritas as etapas para aplicação do modelo desenvolvido.

O modelo deve ser definido com base no modelo conceitual, e uma vez definido deve-se retornar a situação problema (realidade) para verificar a aplicabilidade desta modelagem matemática. Havendo alguma inconsistência relacionada à aplicabilidade do método deve-se reavaliar o modelo conceitual, caso contrário, pode-se dar continuidade e seguir para a solução.

Para solucionar o modelo, as variáveis são analisadas para cada modo de falha. Serão utilizadas as técnicas de análise de decisão multicritério para este fim. O modelo deve ser analisado com base nos dados extraídos da realidade e a partir da solução, além de uma análise de sensibilidade na qual, fornecerá um feedback para o modelo conceitual, verificando assim a robustez e aplicabilidade do mesmo. É importante ressaltar que todas as etapas descritas são recursivas, permitindo assim a iteratividade entre elas.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira:

No Capítulo 2 é exposto uma revisão bibliográfica dos principais conceitos utilizados na dissertação. Este capítulo fornece a base para o entendimento do trabalho e faz parte da etapa de conceitualização exposta na metodologia.

O Capítulo 3 segue a etapa de conceitualização da metodologia à medida que demonstra uma análise da literatura sobre o conceito do *delay-time* para identificação dos modelos existentes que o utilizem.

O Capítulo 4 descreve o desenvolvimento do modelo proposto. Nesta etapa estarão inseridos o modelo conceitual e o modelo matemático

No Capítulo 5 expõem-se os resultados da aplicação e as discussões do modelo desenvolvido ressaltando características, vantagens e observações finais quanto a sua aplicabilidade. Este capítulo será responsável por descrever as etapas de solução e realidade, discutidas anteriormente na metodologia.

No Capítulo 6 são realizadas as conclusões da dissertação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo de fundamentação teórica tem-se como propósito reunir os conceitos básicos, que serviram como alicerce para o desenvolvimento deste trabalho. Segue-se a exposição de alguns conceitos fundamentais que abordam os conceitos de manutenção, as estratégias de manutenção, as políticas de manutenção e de inspeção, o FMEA, sistemas complexos, métodos de apoio a decisão e o conceito *delay-time*.

2.1 Função Manutenção

Durante as últimas décadas, a manutenção dos sistemas tornou-se cada vez mais complexa, mudando a visão anterior da manutenção como um mal necessário para uma parte fundamental da organização (Nicolai & Dekker, 2008).

Pintelon & Parodi-herz (2008) definem manutenção como sendo o conjunto de atividades necessárias para manter ativos físicos nas condições de funcionamento desejadas ou para restaurá-los a esta condição. Em outras palavras, a manutenção deve garantir o bom funcionamento dos ativos para que os mesmos possam operar de maneira eficaz e que atinjam o objetivo a qual foram projetados.

Dekker & Scarf (1998) afirmam que os custos de manutenção tendem a crescer em todos os setores de nossa sociedade, apesar dos avanços técnicos, e discutem três razões para tal. Uma razão principal é a expansão contínua do capital investido em estoque. Todas as estruturas artificiais, como estradas, pontes, edifícios e instalações industriais precisam de manutenção para se manter aptas para uso. A segunda razão é que os requisitos para o funcionamento dos sistemas têm aumentado. Assim, a indisponibilidade de sistemas, como geradores de energia elétrica, tornou-se cada vez menos aceitável. Uma terceira tendência importante é a terceirização de manutenção. Neste caso, há mais tempo para se concentrar nos problemas fundamentais de gestão de manutenção.

Moubray (1997) acrescenta que a manutenção também está respondendo às mudanças nas expectativas. Esta mudança inclui uma crescente conscientização de até que ponto a falha de equipamentos afeta a segurança e o meio ambiente, uma crescente conscientização da conexão entre manutenção e qualidade do produto e pressão crescente para alcançar alta disponibilidade de plantas e conter custos.

Os estudos na área de manutenção têm recebido uma grande atenção devido à crescente complexidade das máquinas e a necessidade de que os sistemas produtivos realizem a sua função de maneira ótima. Os modelos de manutenção que visam à otimização da manutenção devem, portanto, encontrar critérios que retratem a realidade do problema de decisão. A manutenção pode refletir em muitos critérios sendo indicada a utilização de uma abordagem multicritério.

Conforme de Almeida et al. (2015) na revisão sobre a utilização dos métodos multicritério em problemas de manutenção, devido ao aumento da complexidade da modelagem quando o número de critérios aumenta, a maioria das publicações nesta área utiliza apenas dois ou três critérios em seus modelos.

Neste sentido, o gerenciamento da manutenção está ganhando importância e o apoio da ciência é necessário para melhorá-la. Uma dessas abordagens científicas é a otimização da manutenção, com enfoque nas estratégias de manutenção. Estas estratégias serão mais bem discutidas no tópico a seguir.

2.2 Estratégias de Manutenção

Para manter o sistema em funcionamento de acordo com as condições desejadas algumas estratégias de manutenção têm sido largamente aplicadas, a exemplo da manutenção corretiva e da manutenção preventiva, que devem ser escolhidas de acordo com as características do sistema em estudo.

Sendo importante que cada empresa planeje suas estratégias de manutenção de acordo com suas limitações (financeiras, estruturais e tecnológicas) para atender as necessidades e exigências, podendo variar de estratégias a depender do equipamento ou sistema analisado.

2.2.1 Manutenção Corretiva

Manutenção corretiva centra-se na identificação e correção das falhas apenas quando estas ocorrem (Wang et al., 2014a). Fang & Zhaodong (2015) definem-na como as atividades de reparo utilizadas para fazer equipamentos em estado falho recuperarem o estado técnico necessário. Este tipo de estratégia de manutenção contém uma ou todas as seguintes atividades: localização da falha, isolamento da falha, decomposição, substituição, re-instalação, adaptação, verificação e fixação de peças danificadas.

2.2.2 Manutenção Preventiva

Segundo Mirabedini & Iranmanesh (2013) a manutenção preventiva (PM) desempenha um papel significativo na manutenção de equipamentos, com o objetivo de evitar a falha. Pode ser definida como a manutenção de máquinas ou equipamentos antes que qualquer falha ou deterioração ocorra.

Complementando, Moghaddam (2015) conceitua como uma ampla área de operações que engloba um conjunto de atividades, a fim de melhorar a confiabilidade global e a disponibilidade de sistemas. Isso gera custos adicionais de manutenção e por este motivo só vale a pena ser aplicada, se a redução do custo do serviço de reparo for superior ao custo da ação de manutenção preventiva (Liu et al. , 2015). Uma estratégia de manutenção preventiva eficaz tem, portanto, um significativo impacto sobre o custo de manutenção do sistema.

Em contrapartida, a determinação de uma estratégia ótima de manutenção preventiva envolve numerosas incertezas, tais como o estado inicial do sistema, a vida útil do sistema, os custos de manutenção relativos, e a qualidade dos procedimentos de manutenção, onde todos aumentam a dificuldade de decidir sobre uma estratégia (Lin et al, 2015).

2.3 Políticas de inspeção

Outra estratégia utilizada para manter o sistema em funcionamento de acordo com as condições desejadas é a estratégia que utiliza a inspeção associada à manutenção para detecção de falhas. Os primeiros estudos datam da década de 60, quando Barlow & Proschan (1965) citaram pela primeira vez um modelo de custo para um sistema sujeito a uma falha aleatória e cujo este estado só é conhecido por inspeção. A partir de então vários estudos foram realizados para este tipo de estratégia, vide Barlow & Proschan (1975), Aven (1984), Kaio & Osaki (1986), Okumura et al. (1996), Zequeira & Bérenguer (2005), Wang et al. (2010) entre outros.

Nos sistemas complexos a inspeção é essencial. Pois não só permite que as falhas sejam evitadas através da identificação e substituição de peças defeituosas, mas também permite evitar falhas que tenham impactos a segurança potencialmente graves e consequências financeiras (Lopes et al., 2015).

Neste sentido, a determinação dos intervalos de inspeção é uma das decisões de manutenção mais importantes. Porque assim como afirma Jones et al. (2009) é vital ter o

equilíbrio certo entre as atividades de inspeção e as possíveis falhas no equipamento. Pois o custo de uma falha pode ser alto, mas o custo das inspeções que são desnecessárias também pode ser caro. Esses custos, incluindo o tempo necessário para efetuar uma inspeção, o tempo de produção perdido devido à inspeção, o custo de horas-homem desperdiçado tanto diretamente da inspeção como indiretamente dos operadores que não conseguem desempenhar os seus trabalhos contribuem para tornar as inspeções ineficientes.

Assim, como evidenciam Kaio & Osaki (1986), um método eficiente para detectar a falha do sistema deve ser obtido para equilibrar o trade-off entre os custos para inspeção e o *downtime*² do sistema.

Para Jones et al. (2009), nas decisões de inspeção é importante aplicar técnicas para identificar as falhas críticas, os modos de falha e as chances das falhas ocorrerem. Uma técnica comumente utilizada para este fim é a Análise de Efeitos e Modos de Falha (FMEA), a qual considera que os sistemas são compostos por diferentes modos de falha, cada um destes com consequências distintas (Stamatis, 2003).

2.4 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

A metodologia FMEA originou-se nos Estados Unidos no contexto militar na década de 1960. Foi adotada como uma técnica de avaliação da confiabilidade para estimar o impacto das falhas nos sistemas e equipamentos (Bowles & Peláez, 1995).

Devido a sua visibilidade e facilidade, o método FMEA recebeu cada vez mais atenção desde o seu surgimento (Liu et al., 2016). Sua utilização também vem ganhando importância dentro do contexto das decisões de inspeção, para identificação das falhas críticas e dos seus respectivos modos de falha.

O FMEA é um método formalizado para a identificação sistemática de modos de falhas potenciais e as causas e efeitos relacionados a cada uma delas (Feili et al., 2013). Esta análise exige que cada possível modo de falha do sistema seja examinado, e que o efeito do modo de falha sobre o funcionamento do sistema seja determinado (Peláez & Bowles, 1996).

² *Downtime* – Do inglês tempo de inatividade. Este termo será utilizada em inglês, pois ele é comumente difundido na literatura.

De acordo com Kaio & Osaki (1986) o FMEA pode ser dividido em duas categorias com base em seu uso: o FMEA de Projeto e o FMEA de Processo. O foco do FMEA do projeto é analisar a produto (a nível de sistema e subsistema) para obter uma compreensão das preocupações potenciais de qualidade decorrentes do projeto do produto e sua funcionalidade. Já o FMEA de processo é realizado para investigar os procedimentos de fabricação e montagem com o intuito de identificar e analisar possíveis falhas devido ao projeto de processos impróprios.

O caminho para o FMEA melhorar a confiabilidade do sistema é feito pela abordagem de problemas em uma ordem, que ordena os modos de falha do maior para o menor (Xiao et al., 2011).

Nos últimos anos, o FMEA tem sido aplicado com sucesso em uma ampla gama de contextos para melhorar a confiabilidade dos sistemas. Trabalhos no gerenciamento de riscos de segurança da informação (Silva et al., 2014), em usinas de energia geotérmica (Feili et al., 2013), em uma unidade de esterilização (Dağsuyu et al., 2016), para melhorar o processo de tomada de decisão em um departamento de emergência (Chanamool & Naenna, 2016), na produção de ração de aves (Wessiani & Sarwoko, 2015) e para a Análise da Corrupção (Ochрана et al., 2015), são exemplos de aplicações.

2.5 Sistemas Complexos

Para definir os sistemas na literatura podemos dividir em duas abordagens, uma relacionada à estrutura e outra a de acordo com as suas funções.

A primeira abordagem é explicitada por Arnold & Wade (2015), onde o sistema é definido como uma interação regular ou um grupo independente de itens que formam um único todo. Pela segunda ótica, Kamissoko et al. (2015) descreve um sistema como um conjunto coerente de elementos ou processos que compartilham objetivos, responsabilidades ou missões comuns.

Agregando as duas abordagens, Kamissoko et al. (2015) definem sistemas como um conjunto de componentes interconectados que facilitam o fluxo, a fim de cumprir funções específicas.

Sistemas complexos ou sistemas multicomponentes de acordo com Müller-Leonhardt et al. (2014) são categorizados por grandes números de componentes, de diferentes tipos ou

com dependência estatística entre os estados dos componentes. Reforçando ainda que devido à multiplicidade de relações e interações entre as suas partes, os sistemas complexos acarretam em várias formas de trabalhar. Estas interações entre as partes do sistema podem ser classificadas em econômica, estrutural e estocástica.

A dependência econômica implica que o custo da manutenção conjunta do grupo de componentes não é igual ao custo total de manutenção individual desses componentes. A dependência estocástica ocorre se a condição de um dos componentes influencia a distribuição de vida de outros componentes. Já a dependência estrutural se aplica se os componentes estruturalmente formam uma parte, ou seja, a manutenção de um componente defeituoso implica a manutenção de outros componentes ou, pelo menos, sua desmontagem (Nicolai & Dekker, 2008).

Para fins deste trabalho será considerada a definição clássica proposta por Cho & Parlar (1991), na qual descreve como um sistema constituído por várias unidades de máquinas ou muitas peças de equipamentos, que podem ou não depender uns dos outros (economicamente/estocasticamente/estruturalmente).

Nicolai & Dekker (2008) afirma que um sistema é dependente economicamente quando ao realizar atividades de manutenção de vários componentes em conjunto, ocorre uma economia ou um acréscimo nos custos totais de manutenção com relação à manutenção de cada componente em separado. Já a dependência estocástica, implica que o estado dos componentes pode influenciar o estado dos outros componentes. A dependência estrutural refere-se a sistemas em que várias unidades formam uma parte integral, de modo que a manutenção de uma unidade que falhou exige o tratamento de outras unidades da parte igualmente.

Falhas em sistemas complexos não conduzem apenas a uma enorme perda de produção, mas também a questões de segurança do pessoal e ambiente. Portanto, é aconselhável realizar uma política de manutenção adequada para reduzir o risco de falhas (Zhang et al, 2013).

Segundo Van Horenbeek & Pintelon (2013), políticas de manutenção devem ser adaptadas para ter em conta as interações entre componentes e equipamentos a fim de encontrar uma política de manutenção ideal para o sistema e até mesmo toda a planta.

A política de manutenção ótima será específica a cada caso, pois determinados subsistemas podem interagir de diferentes maneiras e influenciarão o comportamento do sistema como um todo.

Por esta razão que é importante otimizar as estratégias e intervenções de manutenção. No entanto assim como de Almeida et al. (2015) afirmam, em contextos reais, nenhum critério pode ser especificado para a otimização e os problemas de tomada de decisão são necessariamente multifacetados e, portanto, requerem vários critérios de decisão. Assim, uma abordagem multicritério é necessária. Os métodos multicritério de apoio a decisão serão descritos no tópico a seguir.

2.6.Métodos Multicritério de Apoio a Decisão (MCDA)

Os métodos multicritério de apoio a decisão (MCDA - *Multiple Criteria Decision Analysis*) são um ramo muito importante da teoria de decisão (Rezaei, 2015).

A tomada de decisão é um fator chave para alcançar o sucesso em qualquer área, especialmente em um campo que necessite uma manipulação de grandes quantidades de informação e o conhecimento como construção. A maioria dos processos de construção e procedimentos é um compêndio de muitas tarefas, processos diferentes e requisitos, envolvendo uma grande variedade de fatores e aspectos a considerar (Jato-Espino et al., 2014).

Desta forma, as tomadas de decisões nestes ambientes podem ser frequentemente uma operação difícil e complexa de resolver. Por estas razões, surgiu a necessidade de um mecanismo capaz de auxiliar a caracterização de tais cenários complexos.

A análise de decisão multicritério emergiu como um ramo da pesquisa de operações destinadas a facilitar a resolução destas questões. Desde então, uma grande variedade de métodos de tomada de decisão multicritério foram desenvolvidas para enfrentá-los sob diferentes circunstâncias e campos de aplicação. (Jato-Espino et al., 2014)

Os métodos MCDA são claramente necessários, quando não se podem representar objetivos de um problema através de uma única métrica, tal qual unidades monetárias. (de Almeida, 2013).

Um contexto o qual se observa uma grande necessidade é a manutenção. Assim como afirma de Almeida et al. (2015) é muito comum encontrar na literatura, investigadores que

defendem a importância da manutenção e que o impacto da aplicação de um plano de manutenção eficaz é muito ampla: podendo variar entre minimizar o custo, maximizar a qualidade de um produto, maximizar a disponibilidade do produto, maximizar a confiabilidade, maximizar os requisitos de segurança, etc.

Diversas foram as aplicações dos métodos MCDA no contexto de manutenção, dentre elas podemos destacar: em um sistema de segurança nuclear (Zio & Bazzo, 2010), em complexos residenciais sob garantia (Cavalcante et al., 2016), em uma usina de cogeração (Cavalcante & Lopes, 2015), em máquina de usinagem CNC (Moghaddam, 2015), em uma rede de suprimento de gás natural (Cavalcante et al., 2011), entre outros.

A análise multicritério da decisão inclui uma ampla variedade de métodos para a avaliação e classificação, ou seleção, de diferentes alternativas que considerem todos os aspectos de um problema de decisão que envolve muitos atores (Isigonis et al., 2015). Estes atores são classificados por de Almeida (2013) em:

- Decisor: aquele que é responsável pela tomada de decisão e possui o poder pela decisão em questão;
- Analista de decisão: que fornece apoio metodológico ao processo decisório;
- Cliente ou Preposto: exercem uma função intermediária entre o decisor e o analista;
- Especialista: fornece informações factuais sobre o problema em análise;
- Stakeholder: tentam influenciar o decisor de alguma forma, através de algum tipo de pressão, muitas vezes são afetados pelas decisões em questão;
- Terceira parte: estes são afetados pela decisão e têm papel passivo no processo decisório.

Ainda de acordo com de Almeida (2013) ao utilizar-se um método MCDA, a combinação dos objetivos se fará através da avaliação subjetiva de um decisor, então se tem uma situação em que os múltiplos objetivos são combinados e avaliados de maneira subjetiva.

Segundo Monghasemi et al. (2015) o objetivo dos métodos multicritério de apoio a decisão é ajudar o decisor, a fim de facilitar o processo de organizar e sintetizar as informações necessárias em uma avaliação, para que o decisor fique satisfeito e confiante com a sua decisão.

Com o objetivo de apoiar o processo decisório, torna-se necessário estabelecer certas condições que possam expressar as preferências do agente de decisão quando da comparação entre duas ações potenciais (Gomes et al., 2009).

A comparação de duas ações pode ser vista como uma procura de duas seguintes situações possíveis de acordo com (Meltem Öztürk & Vincke, 2005):

- Ou a ação A é "pior" que a ação B onde "pior" implica algum tipo de ordem entre as ações e tal ordem refere-se a uma preferência direta (P) a ou esta ordem pode ser induzida a partir de uma medição e seu valor escalar ocorre antes é maior.
- Ou a ação A está "próxima" da ação B onde "próxima" pode ser considerada como indiferença (ação A ou ação B terão o mesmo valor para algum propósito), ou como uma similaridade, ou de novo poderia ser induzida por uma medição na qual as ações têm o mesmo comprimento, peso, confiabilidade.

Se a estrutura de preferências do decisor pode ser representada pela estrutura (P, I), preferência e indiferença, pode-se utilizar o modelo tradicional, no qual se incluem os de critério único de síntese, tal como o modelo de agregação aditivo (de Almeida, 2013).

Entretanto, ainda de acordo com de Almeida et al. (2015) se a estrutura não for adequada e o decisor precisar de outras opções de relações de preferências (Por exemplo: Relação de incomparabilidade), deve-se avaliar o método que pode incorporar essa condição.

O método aplicado nesta dissertação foi o método de sobreclassificação PROMETHEE II (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*), por este motivo será dado um maior enfoque a este no tópico a seguir. Este método foi aplicado em decisões de manutenção em diferentes contextos, alguns destes foram: em poços de distribuição de água (Monte & Filho, 2015), em geração de energia por ondas (Monds, 2013), em uma empresa de distribuição de energia elétrica (Almeida-Filho et al., 2013), em uma unidade de destilação (Ramzan et al., 2009), na gestão de fugas da rede de água (Morais & de Almeida, 2007), em geração de energia (Morais et al., 2015), entre outros.

2.6.1. PROMETHEE II

O método PROMETHEE é um método de sobreclassificação baseado em comparações 'par a par' foi iniciada por J.P. Brans (1982) e desenvolvido por Brans & Vincke (1985). O método originalmente proposto por Brans & Vincke (1985) era composto apenas pelo PROMETHEE I e II, atualmente diferentes variações do método foram propostas a exemplo

do PROMETHE III, IV, V, VI GAIA, entre outros. A aplicação de cada um dos métodos depende da aplicação do problema de decisão e das expectativas do decisor.

Para fins desta dissertação serão discutidos apenas o método PROMETHEE II. Amaral & Costa (2014) afirma que o PROMETHEE II fornece o ranking completo de alternativas, mas como em qualquer estudo MCDA, o decisor tem que identificar alternativas, atribuir pesos, pontuação para os critérios e deve compreender as relações de superioridade entre diferentes alternativas.

No PROMETHEE a estrutura de preferências para cada critério é baseado em comparações de pares. O desvio entre as avaliações de duas alternativas em um critério específico é considerado. Para maiores desvios, o decisor atribui uma preferência maior para a melhor alternativa ou possivelmente nenhuma preferência se o desvio é insignificante. Quanto maior for o desvio maior será a preferência. Estas preferências podem variar entre 0 e 1. (KABIR & SUMI, 2014)

O método PROMETHEE II (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) é um método de sobreclassificação com base em duas etapas: a construção da relação sobreclassificação e exploração desta relação para apoiar o processo de decisão (Brans & Vincke, 1985).

A primeira fase para aplicação do método inclui o enriquecimento da estrutura de preferência, em que a noção de um critério generalizado é introduzida com o objetivo de capturar a gama de diferenças entre as avaliações de cada critério, isto é, descrever a intensidade de preferência de alternativa em alternativa, para um determinado critério, que é designado por $P_j(a, b)$ e recebe valores entre 0 e 1. Cada um dos critérios está associado a um critério generalizado, que pode ser do tipo 1 (usual), tipo 2 (quase-critério), tipo 3 (critério de preferência linear), tipo 4 (critério no nível), tipo 5 (critério de preferência linear com uma zona de indiferença), ou do tipo 6 (Gaussiano). É possível escolher uma função diferente para cada critério.

Critério usual

Para o critério usual a função de preferência é descrita pela Equação 1,

$$P_j(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{se } g_j(a) - g_j(b) \leq 0 \\ 1, & \text{se } g_j(a) - g_j(b) > 0 \end{cases} \quad [1]$$

Assim se os valores são diferentes o decisor tem uma preferência estrita para a ação que tem o maior valor.

Quase-Critério

Para o quase critério, a função de preferência é definida pela Equação 2,

$$P_j(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{se } g_j(a) - g_j(b) \leq l \\ 1, & \text{se } g_j(a) - g_j(b) > l \end{cases} \quad [2]$$

Para um determinado critério $g_j(\cdot)$, a e b são considerados indiferentes enquanto a diferença entre $g_j(a)$ e $g_j(b)$ não deve exceder o valor l ; Se não se torna a preferência estrita.

Critério com limiar de preferência

A $P_j(a, b)$ para o critério com limiar de preferência pode ser descrita pela Equação 3.

$$P_j(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{se } g_j(a) - g_j(b) \leq 0 \\ \frac{g_j(a) - g_j(b)}{m}, & \text{se } g_j(a) - g_j(b) \leq m \\ 1, & \text{se } g_j(a) - g_j(b) > m \end{cases} \quad [3]$$

Essa extensão da noção de critério permite que o decisor prefira progressivamente de a até b para os desvios entre $g_j(a)$ e $g_j(b)$. A intensidade da preferência aumenta linearmente até que este desvio seja igual a m , depois de este valor a preferência é estrita.

Pseudo Critério

Seja $P_j(a, b)$ descrita pela Equação 4 para o pseudo-critério.

$$P_j(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{se } g_j(a) - g_j(b) \leq l \\ \frac{1}{2} & \text{se } l \leq g_j(a) - g_j(b) \leq l + m \\ 1 & \text{se } x > l + m \end{cases} \quad [4]$$

Neste caso, a e b são considerados indiferentes quando o desvio entre $g_j(a)$ e $g_j(b)$ não exceda l , entre l e $l + m$ a preferência é fraca ($1/2$), após este valor a preferência se torna estrita.

Área de Indiferença

Desta vez vamos considerar a Equação 5 para a função de preferência $P_j(a, b)$ da área de indiferença:

$$P_j(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{se } g_j(a) - g_j(b) \leq m \\ \frac{g_j(a) - g_j(b) - 1}{(l+m)} & \text{se } l \leq g_j(a) - g_j(b) \leq m \\ 1 & \text{se } g_j(a) - g_j(b) > l \end{cases} \quad [5]$$

Neste caso, o tomador de decisão considera que a e b são completamente indiferentes quando o desvio entre $g_j(a)$ e $g_j(b)$ não excedem l . Dois parâmetros têm de ser definidos quando um critério é identificado como sendo deste tipo.

Critério Gaussiano

No critério gaussiano a $P_j(a, b)$ é descrita pela Equação 6.

$$P_j(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{se } g_j(a) - g_j(b) \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{(g_j(a) - g_j(b))^2}{2\sigma^2}}, & \text{se } g_j(a) - g_j(b) > 0 \end{cases} \quad [6]$$

Se um determinado critério é do tipo Gaussiano, a preferência do decisor cresce com o desvio $g_j(a) - g_j(b)$. O valor de um pode ser facilmente corrigido de acordo com a experiência obtida com a distribuição normal em Estatística. O valor de σ é a distância entre a origem e o ponto de inflexão da curva. Neste caso específico, apenas o valor de σ tem de ser definido pelo decisor.

Para realizar a generalização dos critérios é necessário primeiro estabelecer as alternativas e avaliá-las de acordo com cada critério; entretanto, para aplicação correta do método é necessário excluir as alternativas dominadas. Alternativas dominadas são aquelas que não são melhores do que outra em nenhum critério.

Na segunda etapa, faz-se a exploração da relação de sobreclassificação com o objetivo de apoiar o processo de decisão. Para explorar tais relações, deve-se primeiro definir os pesos de cada critério para o decisor. Para tal, pode ser utilizada a metodologia ROC (*Rank-Order Centroid*). Morais et al. (2015) demonstraram sucesso na aplicação desta metodologia em conjunto com o PROMETHEE, vez que tem a vantagem de exigir apenas informações ordinais dos critérios do decisor. A metodologia ROC foi uma metodologia proposta por Barron (1992) e é uma técnica de elicitación de peso direto que consiste em ordenar os

critérios do problema de decisão do mais importante para o menos importante, utilizando a Equação 7 para atribuir pesos:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{j} \quad [7]$$

O W_i irá representar o peso atribuído a preferência do decisor com relação a cada critério, n é o número de critério, $j=1, 2, \dots, n$ é a posição dos critérios no ordenamento, $i=1, 2, \dots, n$ e $\sum W_i = 1$, $W_i \geq 0$. O uso de ROC é considerado em diversas análises contextuais, devido à sua qualidade e simplicidade no processo de atribuição de pesos.

Uma vez obtido o peso, determinamos o índice de preferência, o qual é definido e expresso pela Equação 8. Onde $w_i > 0$, $i=1, 2, \dots, n$ e representa os pesos, isto é, a importância relativa de cada critério:

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^m P_j(a, b) w_j \quad [8]$$

A partir do índice de preferência, consideramos dois tipos de fluxos que avaliam alternativas: fluxos de saída e entrada que avaliam as vantagens e desvantagens, respectivamente, de uma alternativa a comparada com todas as alternativas b no conjunto de alternativas considerado.

Finalmente, a pontuação para cada alternativa é obtida a partir do fluxo líquido de uma alternativa resultante da diferença entre os fluxos de saída e os fluxos de entrada. A melhor alternativa é dada pelo maior fluxo líquido. Mais detalhes sobre métodos PROMETHEE podem ser observados em Brans & Vincke (1985).

2.7 Conceito *Delay-time*

Os primeiros estudos sobre o conceito *delay-time* foram datados na década de 70 por Christer. Entretanto, foi formalmente definido por Christer & Waller (1984). O conceito *delay-time* considera que um componente/item/sistema tem três estados operacionais:

- Estado Normal (1)
- Estado Defeituoso (2)
- Estado Falho (3)

O modelo surgiu da observação de que um componente pode se tornar defeituoso e passar um tempo neste estado antes de causar uma falha (*breakdown* do sistema) (Christer & Redmond, 1992). De maneira que no intervalo em que o componente permanece em defeito e

que a falha chega a acontecer (“*delay-time*” do inglês “tempo de atraso”), este defeito pode ser detectado por uma inspeção e ser reparado, antes que as consequências da falha venham a ocorrer. Assim a vida de um componente pode ser descrita de acordo com os estados citados acima e demonstrados na figura 2.1.

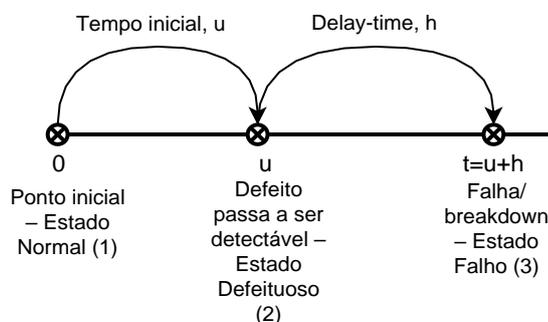


Figura 2.1 – *Delay-Time*

Fonte: Adaptado de Christer & Redmond (1992)

O componente sai do estado inicial, onde estava no estado normal e leva o tempo inicial, u , para que o defeito torne-se identificável. O *delay-time*, h , é o intervalo de tempo gasto entre quando o defeito torna-se identificável (estado 2) e o tempo onde a falha ocorre (estado 3).

O *delay-time* pode ser visto com uma janela de oportunidade para identificar os defeitos através de inspeção e repará-los antes que a falha chegue a ocorrer e tenha consequências maiores. De acordo com Christer & Redmond (1992) um componente que é substituído no estado defeituoso reduziria custos e *downtime* em comparação com a substituição por falha.

Assim, Jia & Christer (2002) complementam que a grande novidade deste modelo é relacionado a tentativa de quantificar o tempo no qual o sistema permanece no estado defeituoso, e então, utilizá-lo na modelagem de manutenção.

Christer (1999) demonstra que o conceito *delay-time* é usual através da Figura 2.2. Considerando que os componentes estudados seguem o padrão *delay-time*, onde o componente assume dois estados, o defeituoso e o falho.

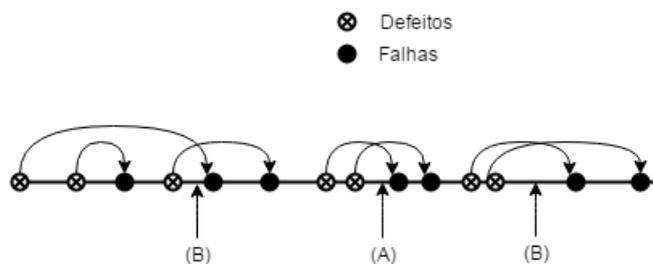


Figura 2.2 - Utilidade do conceito *delay-time*

Fonte: Adaptado de Christer (1999)

Se as inspeções ocorrerem no ponto (A) uma falha poderia ser evitada. Já se as inspeções ocorrerem nos pontos (A) e (B) 4 defeitos poderiam ser identificados e os efeitos da falha evitados. Assim Christer (1999) mostra que desde que seja possível modelar a chegada de defeitos e o seu *delay-time*. O conceito *delay-time* é muito útil para relacionar a frequência de inspeções e o número de falhas. Possibilitando assim, que se construa um modelo de manutenção baseado em tempo, T.

Os modelos *delay-time* foram aplicados em diferentes modelos de manutenção. Christer (1999) classificou-os em dois tipos básicos. Um modelo aplicado a uma planta complexa, ou planta multicomponentes, que é aquela onde um grande número de modos de falha é levado em consideração, e a correção de um defeito ou falha tem impacto sobre as características gerais de falha da planta. O segundo modelo *delay-time* é aplicado a inspeção de um único componente reparável, assumindo um único modo de falha associado.

O efeito da inspeção pode ser reduzido por resultados das inspeções imperfeitas, no sentido de que uma inspeção pode não revelar o verdadeiro estado de um sistema: podendo diagnosticar um sistema que está funcionando como falho (resultado falso positivo) e um sistema que está em falha como que está em bom funcionamento (resultado falso negativo). (Flage, 2014)

A qualidade das inspeções irá depender das técnicas utilizadas, treinamentos recebidos e da supervisão aplicada. Um método utilizado para modelar estas situações é considerar uma probabilidade “r” de um defeito ser identificado, considerando $r < 1$.

2.8 Considerações finais do capítulo 2

Este capítulo apresentou alguns conceitos relevantes para o entendimento deste trabalho. Ao retratar a importância da manutenção, este capítulo evidencia a importância das políticas de inspeção, da utilização do FMEA, das técnicas MCDA e dos sistemas complexos.

Ao longo dos últimos anos, a manutenção vem aumentando a sua complexidade assim como sua importância dentro do contexto empresarial. Em consequência disto, os estudos na área aumentaram muito e diferentes estratégias de manutenção foram estudadas. Dentre estas, o capítulo destacou uma estratégia que utiliza a inspeção associada à manutenção para detecção de falhas e neste contexto conceituou o FMEA que é uma metodologia utilizada para identificação sistemática dos modos de falha.

O capítulo 2 também formalizou o conceito de sistemas complexos e dos modelos de apoio a decisão. Por fim, foi estabelecida uma visão geral dos métodos multicritério de apoio a decisão, retratando o PROMETHEE II e o conceito *delay-time* que serão utilizados neste trabalho.

O conceito *delay-time* emergiu da observação de que antes de um componente chegar a falha, ele é precedido por um defeito. O intervalo de tempo entre a ocorrência do defeito e a falha pode ser utilizado para realizar ações de manutenção preventiva, reduzindo os impactos da falha no sistema.

Todos estes conceitos mostraram-se relevantes para o desenvolvimento e entendimento deste trabalho, servindo como embasamento teórico desta dissertação. No próximo capítulo será realizado uma análise da literatura do conceito *delay-time*.

3. ANÁLISE DA LITERATURA - DELAY-TIME

Este capítulo busca descrever as diversas visões e abordagens encontradas na literatura dos últimos dez anos sobre o conceito *delay-time*, de modo a abranger as várias faces deste problema. Será analisado neste capítulo o desenvolvimento dos artigos publicados de acordo com o ano de publicação e os critérios mais comuns para formulação dos problemas.

3.1 Análise dos critérios utilizados na literatura dos modelos *delay-time*

Com o intuito de realizar uma análise do estado atual das pesquisas e identificar as direções, neste capítulo será realizada uma análise geral da literatura acerca dos modelos *delay-time* publicados nos últimos dez anos, para isso, foram analisados um conjunto de 29 publicações, disponíveis na plataforma *Science Direct* e *Web of Science*, contemplando publicações entre 2007 e 2016. Em seguida os artigos foram analisados de acordo com o ano de publicação e os critérios mais comuns para formulação dos problemas, como será mostrado a seguir.

3.1.1 Aplicação de Modelos *Delay-time*

O conceito *delay-time* foi proposto por Christer (1976) e desde então várias pesquisas foram desenvolvidas. Assim como mostram as revisões da literatura relacionadas ao *delay-time* apresentadas por Baker & Christer (1994) e Wang (2012).

Cai et al. (2007) propuseram um modelo de inspeção para minimizar o custo de manutenção. A influência da taxa de falha média do sistema, o custo de manutenção total e a inspeção imperfeita são ilustrados através de um exemplo prático em uma estrutura de aeronave.

Andrawus et al. (2008) utilizaram um modelo híbrido entre o modelo *Delay-time* para avaliar as características da falha de um subsistema de uma turbina de eólica. Intervalos de inspeção para os subsistemas críticos da turbina são determinados para minimizar o custo. Estes subsistemas são caracterizados de acordo com os modos de falha.

Akbarov et al. (2008) propuseram a utilização de várias ferramentas analíticas que se complementam, entre estas a análises de regressão, a modelagem *snapshot* e a modelagem

delay-time. O critério custo é minimizado, a partir de dados estimados junto a especialistas, concluindo que as estimativas podem revelar uma contribuição útil para a modelagem. A análise mostra como uma modelagem simples de problemas de manutenção pode fornecer informações úteis e uma melhor compreensão do problema.

Wang (2008) apresentou uma modelagem que foi criada para os problemas de inspeção e de intervenções de manutenção planejada com a modelagem *delay-time*. Descreveu diferentes abordagens de modelos *delay-time*, mostrando algumas aplicações em casos reais. Estes foram otimizados com base em custos e/ou em *downtime*.

Aven & Castro (2009) consideraram o modelo *delay-time* em um sistema com três estados, o estado de funcionamento perfeito, um estado defeituoso e o estado de falha. O sistema se deteriora com o tempo e para reduzir o número de falhas, substituições preventivas são realizadas quando o sistema está no estado defeituoso. As falhas do sistema são críticas para segurança. O problema abordado foi a determinação dos intervalos, que minimizavam os custos esperados sob as restrições de segurança.

Jones et al. (2009) propuseram uma metodologia de análise com *delay-time*. O objetivo foi reduzir o *downtime* dos itens e/ou reduzir os custos de manutenção e inspeção, levando em conta o possível impacto ambiental de uma falha em termos de custo, tanto para a empresa quanto para o ambiente.

Aven (2009) considerou um sistema de segurança onde o estado dos componentes do sistema só é revelado através da inspeção, que é realizada em intervalos fixos. O problema de decisão foi encontrar o intervalo que minimiza o custo esperado. Os custos estão associados a inspeções e aos *downtime* do sistema.

Wang (2009) considerou um processo de produção que pode estar sujeito a dois tipos de deteriorações. A primeira é uma mudança na qualidade do produto causada por defeitos menores no processo, que podem ser identificados e retificados por inspeções de rotina. A segunda um defeito de maior proporção causado por problema mecânico ou elétrico. O modelo de inspeção para este problema otimizou os custos, variando os intervalos de inspeção para ambos os tipos de inspeções.

Ferreira et al. (2009) propuseram um modelo de decisão para determinar intervalos de inspeção considerando, simultaneamente, o comportamento de falha do equipamento a ser

inspecionado com base no *delay-time* e as características de preferências do decisor considerando os critérios custo e *downtime*.

Hu et al. (2009) consideram a redução da idade proporcional a um modelo *delay-time*. Exemplos numéricos foram utilizados para mostrar que a manutenção imperfeita aumenta o custo médio a longo prazo por unidade de tempo e um intervalo de inspeção ótimo onde os custos são minimizados.

Wang (2011) considerou um modelo que relacionava as atividades de inspeção com a logística de reposição de peças. O modelo foi desenvolvido através de uma otimização conjunta de três variáveis de decisão: a quantidade de pedidos de peças de reposição, a ordem em que as peças será solicitada e o intervalo de inspeção. A função objetivo é relacionada a minimizar custo.

Cavalcante et al. (2011) consideraram uma política de inspeção para um único componente de um sistema de proteção, em que o componente provém de uma população heterogênea. Em qualquer ponto no tempo, o sistema pode estar em um dos três estados, bom, com defeito ou falha. O sistema só é utilizado em caso de emergência, e, a fim de garantir uma elevada disponibilidade do sistema, são realizadas uma sequência de inspeções. São considerados os critérios de disponibilidade e custo. A política é estudada no contexto de uma válvula numa rede de abastecimento gás.

Cunningham et al. (2011) apresentaram uma metodologia para a aplicação da análise de *delay-time* por meio de uma simulação Monte Carlo. Onde é demonstrada a eficácia e o valor de análise *delay-time*, ressaltando como o modelo pode fornecer aos engenheiros mais informação na tomada de decisões de manutenção. A metodologia foi desenvolvida e aplicada a dois estudos de caso com o objetivo de minimizar o *downtime* esperado.

Lu & Wang (2011) usaram o conceito *delay-time* e os modelos associados a este para apresentar um estudo para otimizar o intervalo de manutenção preventiva (PM). Os parâmetros do modelo são estimados e validados através de simulação. É proposto um modelo para otimizar o *downtime* esperado por unidade de tempo.

Wang et al. (2011) desenvolveram um modelo *delay-time* considerando manutenção imperfeita na inspeção e manutenção perfeita na falha. Um modelo de disponibilidade foi estabelecido. Simulações numéricas foram realizadas para estudar a influência das inspeções

imperfeitas sobre a disponibilidade. Os resultados demonstraram que a manutenção imperfeita diminui a disponibilidade em longo prazo.

Wang et al (2012) modelou o mecanismo de falha onde as chegadas de defeitos são assumidas como processos de Poisson. As variáveis de decisão são os intervalos de inspeção, enquanto a função objetivo é expressa em termos de custo, *downtime* ou confiabilidade. O modelo foi demonstrado através de um exemplo numérico.

Lu et al. (2012) estudaram um sistema com um componente e outro redundante. O processo de falha destes dois componentes são estatisticamente idênticos. A inspeção periódica é realizada para verificar se o componente está defeituoso ou não. Se o defeito for identificado, o componente é desligado e enviado para reparo. A capacidade de reparo é limitada para reparar apenas um componente. Apresentam cinco cenários do estado do sistema em um período de inspeção, que são derivados analiticamente. O custo mínimo por unidade de tempo foi encontrado.

Wang (2013) propôs um modelo para um sistema de um componente. Este foi utilizado para modelar conjuntamente o efeito do Serviço de Rotina (RS) e da inspeção com substituição. Um modelo de custo foi estabelecido. Assume o RS como uma atividade que prolonga o estágio normal do sistema e a substituição como a atividade que renova o sistema.

van Oosterom et al. (2014) desenvolveram um modelo *delay-time* para determinar a política de manutenção sob suposição de substituição adiada. A principal motivação foi conseguir uma melhor utilização do tempo de vida útil do sistema, e minimizar o custo médio de longo prazo, fornecendo uma janela de tempo suficiente para preparar os recursos de manutenção.

Flage (2014) apresentou um modelo em que as inspeções são imperfeitas e, potencialmente, induzem a falha. O problema abordado consistiu em determinar o intervalo de inspeção e o limite de substituição preventiva por idade que minimizem custo esperado. Dois exemplos numéricos foram apresentados, e algumas extensões possíveis do modelo foram indicadas.

Wang et al (2014b) apresentaram um modelo de dois níveis para um sistema com único componente. O primeiro nível de inspeção, a inspeção menor, só pode identificar o estágio com defeito menor com uma certa probabilidade, mas sempre pode revelar o estágio

com defeito grave. A inspeção principal pode, contudo, identificar ambos os estágios defeituosos. O modelo otimizou o custo a longo prazo esperado por unidade de tempo.

Lopes et al. (2015) propuseram uma política para o desenvolvimento de um programa de inspeção e programação de equipes de inspeção e de resposta ao *breakdown*. Com objetivo de encontrar o tempo entre as inspeções, foram encontrados: o número de equipes para agendamento e o número de equipes para atender o *breakdown* que minimizam o custo.

Nazemi & Shahanaghi (2015) discutiram uma política de inspeção para estruturas. Propuseram um modelo estocástico com tempos discretos de atividades de inspeção que minimizam a razão total de *downtime*. Os resultados indicaram a redução substancial do *downtime* do sistema devido ao plano de inspeção proposto e a utilização adequada do conceito *delay-time*.

Yang et al (2015) propuseram um modelo de inspeção que otimizou o intervalo de inspeção, minimizando o custo esperado por unidade de tempo. Assumiram que a inspeção é imperfeita para identificar o estágio defeituoso menor. A inspeção perfeita, porém, é realizada se a inspeção detecta que o sistema esta com defeito grave. O modelo foi aplicado a rolamentos.

Yang et al. (2016) propuseram uma política de inspeção para um sistema de componente único que executa missões com durações aleatórias. O processo de falha do sistema pode ser dividido em dois estados, normal e defeituosos. As inspeções são realizadas periodicamente e imediatamente após a conclusão de cada missão (inspeções aleatórias). Obtiveram o custo esperado por unidade de tempo.

Emovon et al. (2016) apresentaram uma metodologia que integra a análise de decisão multicritério (MCDA) com um modelo *delay-time* para a determinação dos intervalos de inspeção em sistemas marítimos. Com esta abordagem, os critérios de decisão (custo, *downtime* e reputação) são modelados e agregados através do MAUT e ELECTRE.

Ramadan (2016) apresentou um modelo de otimização bi-objetivo para encontrar o número e o tempo aperiódico para as inspeções de sistemas reparáveis com vida finita. Considerando a disponibilidade do componente e o custo de manutenção total.

Com objetivo de proporcionar uma visão global, a Tabela 3.1 apresenta os principais critérios utilizados para definir uma política de inspeção *delay-time* encontrados na literatura

entre os anos de 2007 a 2017. Vinte e nove artigos foram seleccionados e classificados de acordo com os critérios utilizados para otimização.

Tabela 3.1 – Classificação das referências de acordo com os critérios de otimização

Autor	Ano	Custo	Donw Time	Confia Bilidade	Segu Rança	Impacto Ambiental	Lu cro	Repu Tação
Cai et al.	2007	X						
Akbarov et al.	2008	X						
Andrawus et al.	2008	X						
Wang	2008	X	X					
Aven & Castro	2009	X						
Jones et al.	2009	X	X			X		
Wang	2009	X					X	
Ferreira, et al.	2009	X	X					
Hu et al.	2009	X						
Wang	2011	X						
Cavalcant e et al.	2011	X	X					
Cunningh an et al.	2011		X					
Lu e Wang	2011		X					
Wang et al.	2011			X				
Wang et al.	2012	X	X	X				
Lu et al.	2012	X						

Wang et al.	2013	X					
Ferreira et al.	2013	X	X				
van Oosterom et al.	2014	X					
Flage	2014	X					
Wang et al.	2014	X					
Lopes et al.	2015	X					
Nazemi & Shahanaghi	2015		X				
Yang et al.	2015	X					
Yang	2016	X					
Emovon et al.	2016	X	X				X
Ramadan	2016	X	X				
Este trabalho	2017	X	X	X	X	X	X

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Nas publicações avaliadas e demonstradas através da Tabela 3.1, foram encontrados 8 critérios, com diferentes denominações. Um ponto que pode ser observado nesta análise é que apenas um artigo utilizou a classificação dos sistemas de acordo com seus modos de falha (Andrawus et al., 2008).

3.1.2 Distribuição de publicações

A evolução do número de artigos por ano é mostrada na Figura 3.1. A distribuição das publicações indica a relevância da pesquisa em métodos *delay-time*. A percepção de que a falha é precedida por um defeito foi consolidada ao longo dos anos nos estudos de manutenção e inspeção.

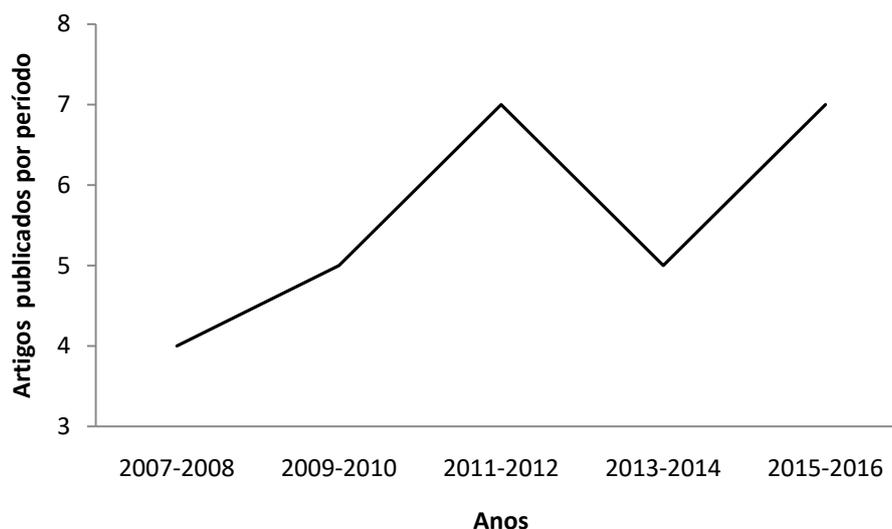


Figura 3.1 - Número de artigos publicados por período até 2016

Fonte: Esta Pesquisa (2017).

A partir de 2007 foi possível observar uma tendência crescente no número de publicações que utilizaram o conceito *delay-time*. Nos anos de 2011 a 2012 e de 2015-2016 foi observados a mesma quantidade de artigos publicados (7 por período). Entre 2013 e 2014 ocorreu um decréscimo (5 por período). É importante ressaltar que devido ao período de realização da pesquisa alguns artigos publicados ainda em 2017 podem não ter sido considerados por ainda não estarem disponíveis.

3.1.3. Critérios de decisão utilizados nos modelos *delay-time*

Problemas de manutenção e inspeção são questões relevantes enfrentadas por empresas. Para fins práticos, o objetivo da empresa muitas vezes não é único, e as funções objetivo conflitantes desses modelos dependem das particularidades do sistema de produção. Entretanto, de acordo com de Almeida et al. (2015) a complexidade da modelagem trade-offs entre critérios e a busca pelas melhores soluções são questões que se tornam mais difícil quando o número de critérios abordados no modelo aumenta.

Neste sentido, uma concentração mais elevada de artigos com o uso de um, ou dois é predominante. A maioria dos artigos pesquisados utiliza um único critério para otimização 64% e 25% dos artigos utilizam 2 critérios de otimização. Apenas 11% usaram 3 critérios.

Nas publicações avaliadas foram encontrados diferentes critérios, com diferentes denominações. Entre os termos mais comuns usados na definição desses critérios, o termo

'custo' foi encontrado em 25 artigos, e *Downtime* em 11 trabalhos. A distribuição destes critérios é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Distribuição dos critérios

Critérios	Nº utilizações	%
Custo	25	86%
<i>Downtime</i>	11	38%
Confiabilidade	2	7%
Segurança		
Impacto Ambiental	1	3%
Lucro	1	3%
Reputação	1	3%

Fonte: Esta Pesquisa (2017).

Entre os critérios mais comuns utilizados, o custo foi encontrado em 25 artigos (86,21%), e *downtime* em 11 (37,93%). O número de artigos que utiliza pelo menos um destes dois critérios representa 96,56% do total. Os demais apareceram em menor quantidade, sendo confiabilidade em 6,90% do total. Os critérios impacto ambiental, lucro e reputação apareceram em 3,45% cada. O critério segurança foi utilizado como restrição por Aven & Castro (2009).

Para ilustrar a composição dos modelos com maior clareza, os critérios foram avaliados de acordo com suas ligações conjuntas entre os critérios e o conceito delay-time. Os pormenores da distribuição conjunta dos termos são mostrados na Figura 3.2.

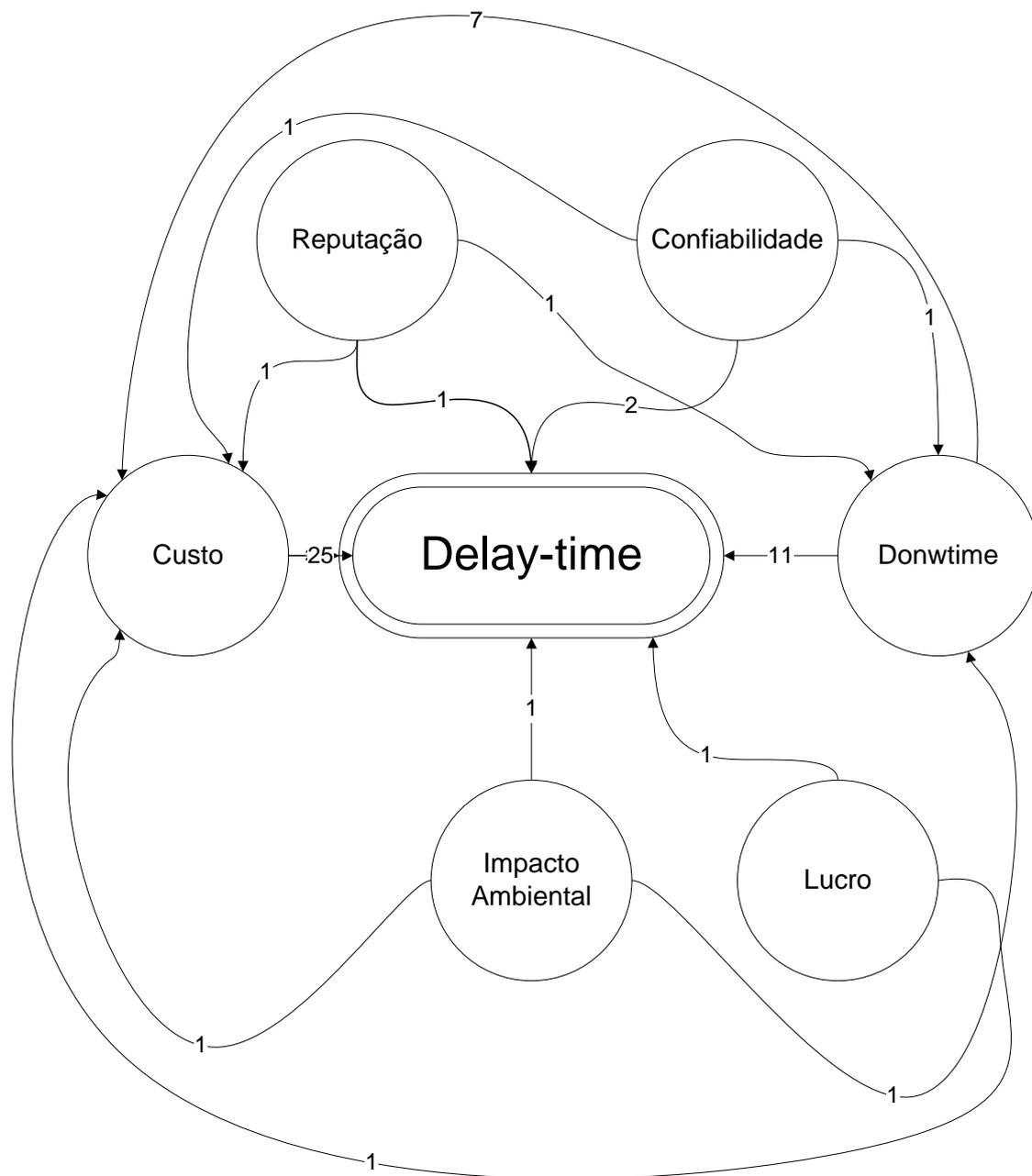


Figura 3.2 - Distribuição de interseção dos critérios usados com *Delay-time*

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A Figura 3.2 mostra a predominância do cruzamento dos 7 artigos que usam o conceito *delay-time* com o critério custo e *downtime*. É possível observar também o cruzamento do conceito *delay-time* com o critério impacto ambiental e *downtime*. Outro cruzamento que pode ser destacado é o da reputação com o custo e o *downtime*. Foi observado uma grande predominância de cruzamentos com os critérios custo e *downtime*, os mais utilizados na literatura.

Portanto, é possível destacar que na literatura relacionada ao *delay-time*, pouca atenção tem sido dada a utilização de mais de três critérios nas modelagens de inspeção e a classificação dos sistemas de acordo com os modos de falha. A relevância da modelagem *delay-time* dentro de gestão da manutenção justifica a necessidade de um quadro metodológico para analisar estes pontos em conjunto.

3.2 Considerações finais do capítulo 3

Este capítulo teve como propósito explicar sobre o *delay-time*, evidenciando suas características, ampliando a visão sobre suas importantes contribuições no contexto do gerenciamento da manutenção.

Ao analisar os artigos publicados sobre este tema na literatura dos últimos 10 anos, foi possível constatar o aumento no interesse das pesquisas nesta área. Observou-se que a maioria dos artigos pesquisados utilizou um ou dois critérios de otimização, outra pequena parte utilizaram três. Foram tabulados também os principais critérios utilizados para otimização do intervalo de manutenção utilizando o conceito *delay-time*, os mais utilizados foram o custo e o *downtime*. A combinação da utilização do conceito com os critérios foi mostrada através de uma representação visual e discutida em seguida. Houve predominância no cruzamento do *delay-time* com o custo e com o *downtime*, e dos demais critérios com um destes dois, tendo em vista que estes são os mais comumente estudados na literatura.

De forma geral, verifica-se que o *delay-time* é uma importante área a ser explorada tanto por empresas quanto por pesquisadores. No próximo capítulo o problema de gerenciamento de manutenção será estruturado com o intuito de se identificar os principais critérios e em seguida será proposta um *framework* para auxiliar a modelagem para definição do intervalo de inspeção.

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Como observado nos capítulos anteriores, há um carência na utilização de mais de um critério nas modelagens de manutenção que utilizam os conceitos *delay-time* e a classificação de acordo com os modos de falha. Neste sentido, surgiu à necessidade de explorar estas lacunas. Para isso, foi desenvolvida um framework para o desenvolvimento de um modelo de inspeção *delay-time* em conjunto com os métodos de decisão multicritério e a abordagem qualitativa FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*).

Este capítulo tem por objetivo descrever a metodologia utilizada para o desenvolvimento do modelo utilizado nesta dissertação.

4.1 Desenvolvimento do Modelo de inspeção – Um modelo híbrido entre o *Delay-time* e o FMEA

A definição de uma política de inspeção é um grande desafio para os gestores de manutenção. Wang (2008) destaca que para modelagem *delay-time* em sistemas complexos, uma aproximação é realizada de modo que as chegadas de defeitos de todos os componentes sejam agrupadas, sendo necessário também, assumir que o *delay-time* de todos os defeitos segue uma distribuição idêntica. Entretanto, ao se agrupar a chegada de defeitos e tempos de *delay-time*, implicitamente se agregam os diferentes modos de falha. Esses podem ter impactos diferentes e por isso ter consequências diferentes. Este trabalho propõe investigar a política de inspeção considerando diferentes MF.

Como destacado por Jones et al. (2009), para as decisões de inspeção é importante aplicar técnicas para identificar as falhas críticas, os modos de falha e as chances das falhas ocorrem. Uma técnica comumente utilizada para este fim é a Análise de Efeitos e Modos de Falha (FMEA), que considera que os sistemas compreendem diferentes modos de falha, cada um destes com consequências distintas (Stamatis, 2003).

Tradicionalmente, análise dos modos de falha, definição dos critérios que representam os modos de falha e a definição dos intervalos de inspeção são tratados como assuntos independentes para determinar uma política de inspeção. Considerar estes princípios conjuntamente para cada modo de falha (MF) é uma subdivisão pouco utilizada na literatura de modelagem de inspeções.

A seguir será proposto um framework para auxiliar os gestores de manutenção a definir o intervalo entre inspeções, considerando três principais elementos: avaliação dos MF do sistema, seleção dos critérios que melhor representam cada MF e o processo de determinar o melhor intervalo para as inspeções através da utilização de uma abordagem multicritério. Estes três elementos em conjunto constituem uma nova metodologia proposta para definição da política de inspeção. Esta metodologia permite uma visão holística na definição da política de inspeção.

As seguintes notações foram utilizadas:

h	<i>Delay-time</i>
m	Números de modos de falha no sistema
T	Intervalo de tempo fixo entre as inspeções
r_m	Probabilidade do defeito ser identificado na inspeção
θ_m	Fator de redundância para o modo de falha m
β_m	Parâmetro de forma da distribuição <i>delay-time</i> , $f(h,m)$
Φ_m	Parâmetro de escala da distribuição <i>delay-time</i> , $f(h,m)$
k_m	Taxa de chegada de defeitos relacionados ao modo de falha m
Cb_m	Custo médio relacionado ao <i>breakdown</i> decorrente de cada modo de falha m
CR_m	Custo médio relacionado ao reparo na inspeção decorrente de cada modo de falha m
Ci_m	Custo médio relacionado à inspeção decorrente de cada modo de falha m
db_m	Tempo de <i>downtime</i> médio relacionado ao <i>breakdown</i> decorrente de cada modo de falha m
di_m	Tempo de <i>downtime</i> médio relacionado ao reparo do defeito decorrente de cada modo de falha m
Rb_m	Impacto da falha na reputação relacionado a cada modo de falha m
Ri_m	Impacto do defeito na reputação relacionado a cada modo de falha m
EA_m	Impacto ambiental da falha relacionado a cada modo de falha m
EAI_m	Impacto ambiental do defeito relacionado a cada modo de falha m

ER_m Impacto ambiental da falha relacionado a cada modo de falha m considerando a reversibilidade da falha.

FR_m Tempo em que o impacto ambiental pode ser revertido ao estado inicial antes da falha decorrente do modo de falha m

Qb_m Impacto da falha na qualidade percebida pelo cliente relacionado a cada modo de falha m

Qi_m Impacto do defeito na qualidade percebida pelo cliente relacionado a cada modo de falha m

ISS_m Impacto ocasionado pela falha na saúde e segurança do trabalhador relacionado a cada modo de falha m

4.1.1 O *framework* proposto

O *framework* proposto tem como objetivo auxiliar o decisor a selecionar o intervalo de inspeção levando em consideração que o sistema é agregado de acordo com os seus modos de falhas, sendo possível identificar os critérios que representam cada modo de falha. Neste modelo serão considerados os critérios custo, *downtime*, reputação, ambiental, saúde e segurança e qualidade.

Um *framework* proposto consiste em 6 etapas para integrar a análise qualitativa dos modos de falha FMEA e o conceito *delay-time*. Conforme exposto Figura 4.1.

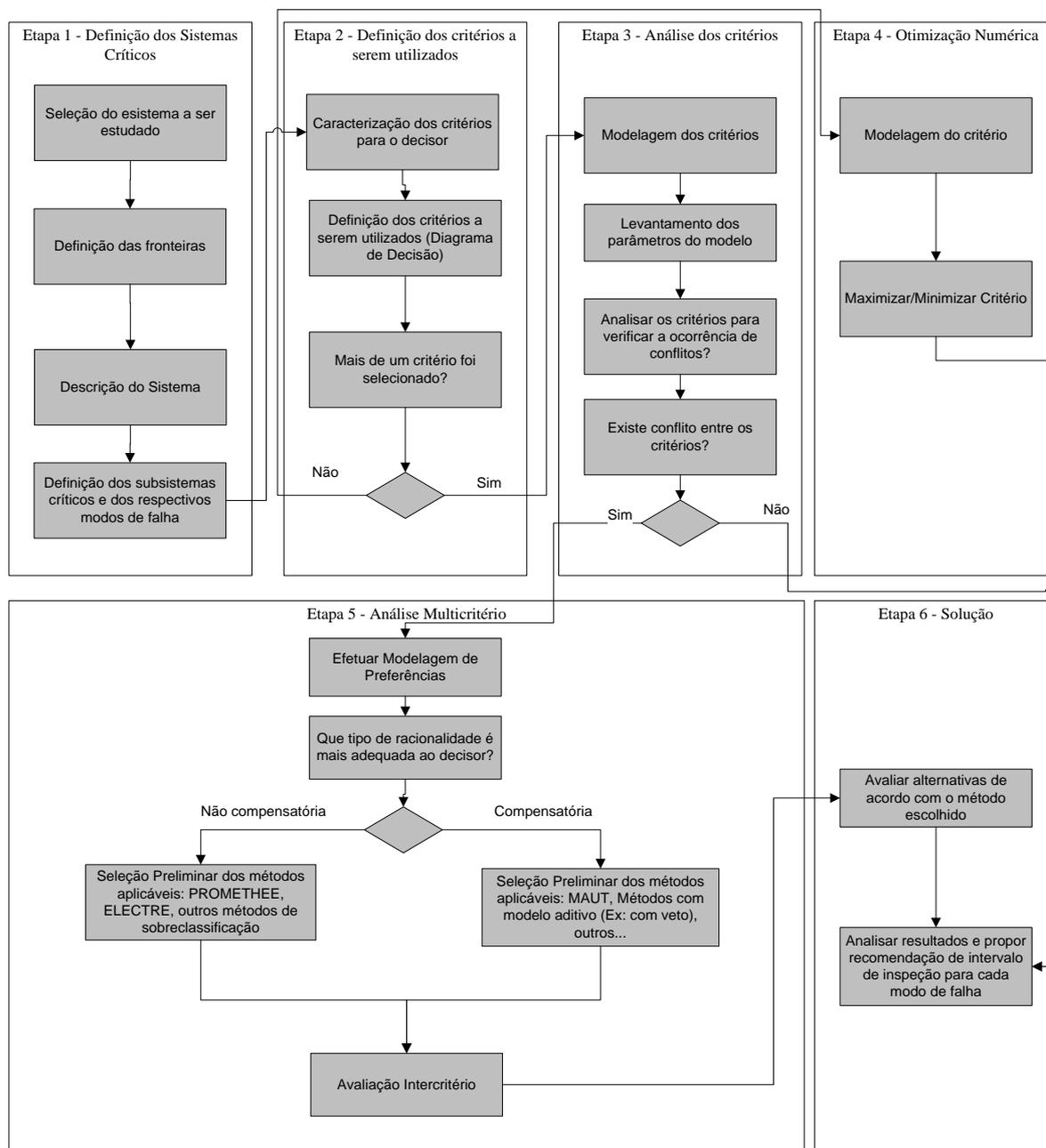


Figura 4.1 – Framework proposto

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A primeira etapa consiste em identificar e documentar o sistema a ser estudado. De acordo com Deshpande & Modak (2002) e Moubroy (1997) para selecionar o sistema, deve-se levar em conta sua significância para o processo. Métodos qualitativos e quantitativos podem ser utilizados para este fim, a exemplo da análise de Pareto demonstrado em Mengesha et al. (2013), *snapshot* proposto por Desa & Christer (2001). Uma vez definido o sistema deve-se

definir quais as fronteiras do estudo, posteriormente o sistema deve ser descrito, objetivando caracterizar as funções desempenhadas.

A descrição do sistema contém as funções principais e secundárias, dos sistemas e subsistemas. Após identificar as funções, identificam-se os modos de falha. Moubray (1997) define um modo de falha como qualquer evento que é susceptível de causar uma falha funcional. Portanto primeiro deve-se fazer uma lista de falhas funcionais, em seguida, identificar os modos de falhas que resultam em falha funcional.

Na segunda etapa do framework os critérios serão caracterizados no problema de decisão e serão selecionados o(s) critério(s) utilizado(s) para representar o impacto de cada modo de falha. Neste sentido, é proposto um diagrama lógico de decisão para auxiliar a identificar os diferentes aspectos de maneira estruturada. O diagrama está apresentado na Figura 4.2. Os modos de falha poderão ser avaliados de acordo com os objetivos definidos pelo decisor, estes foram representados de acordo com os critérios: custo, *downtime*, reputação, qualidade, impacto ambiental e saúde/segurança. Um modo de falha pode ter impacto em diferentes critérios. Assim os impactos em cada modo de falha resultarão nos critérios a serem analisados.

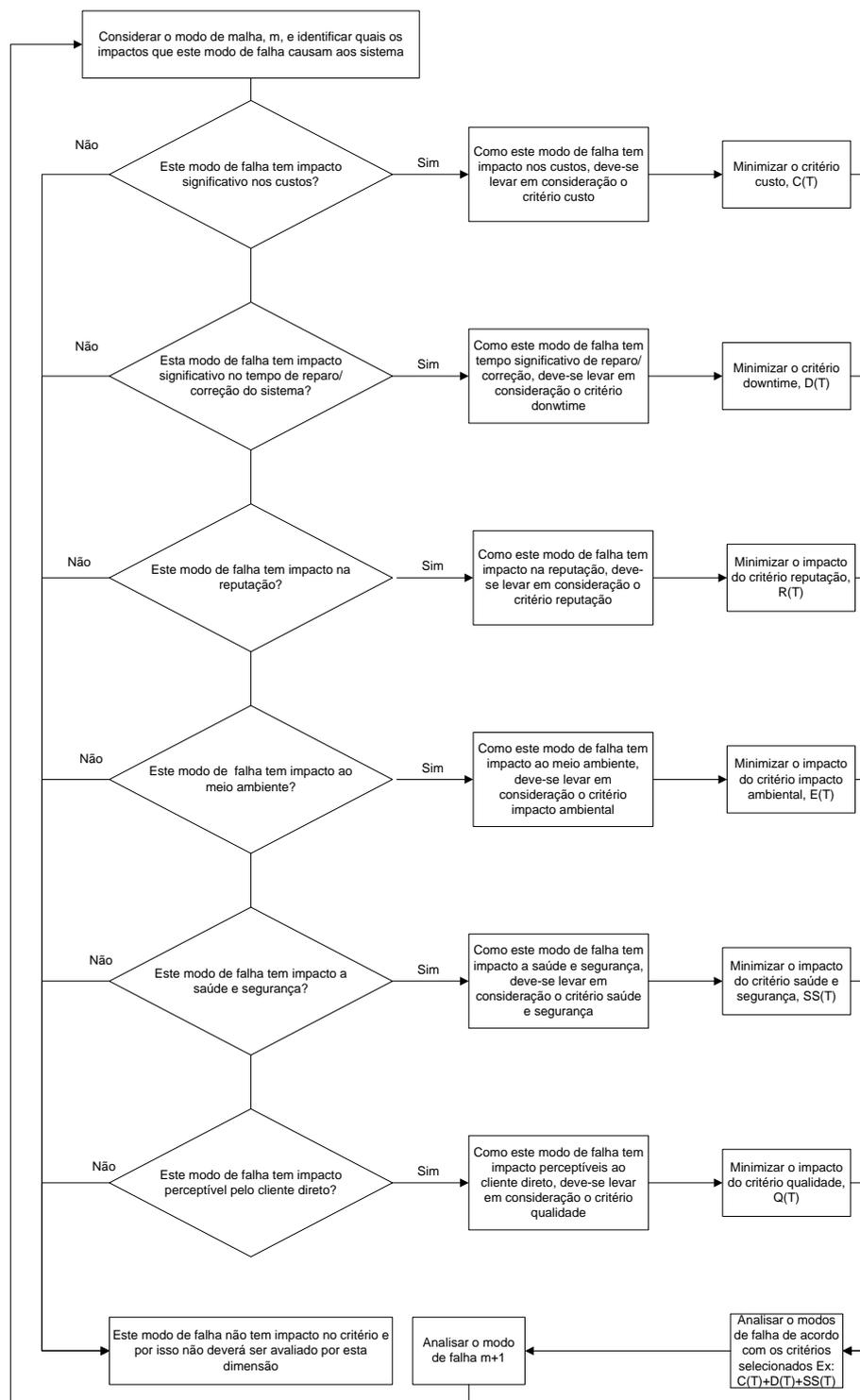


Figura 4.2 – Diagrama Lógico para selecionar quais critérios

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

O decisor deve responder as questões apresentadas na Figura 4.2, através das respostas os critérios vão sendo selecionados, se apenas uma destas perguntas foi respondida com

“Sim”, ou seja, apenas um critério foi selecionado, deve-se seguir para etapa 4. Entretanto, se mais de um critério foi selecionado segue-se para etapa 3.

A etapa 3 consiste na modelagem dos critérios definidos na etapa anterior e no levantamento dos parâmetros necessários. Para esta etapa, o modelo assume as seguintes premissas:

- I. A inspeção ocorre para cada modo de falha m em intervalos fixos T , custa Ci_m unidades e requer Di_m unidades de tempo, onde $Di_m \ll T$;
- II. As inspeções são imperfeitas, nas quais os defeitos tem uma probabilidade r_m de serem identificados na inspeção do modo de falha m .
- III. Os defeitos identificados serão reparados durante o período de inspeção;
- IV. Os defeitos de cada modo de falha surgem a uma taxa constante por unidade de tempo, k_m .
- V. A função densidade de probabilidade do *delay-time* de cada modo de falha m é $f(h,m)$ é independente do ponto inicial e conhecida;
- VI. Os modos de falha serão imediatamente reparados a um custo médio Cb_m e um *downtime*, Db_m ;
- VII. O sistema é considerado de acordo com os seus modos de falhas;
- VIII. Todos os modos de falha são independentes;
- IX. As inspeções são programadas para cada modo de falha, em vez de para cada componente individual ou para o sistema como um todo;
- X. Inspeções oportunas não ocorrem.

Algumas dessas suposições requerem mais explicações por serem menos encontradas na literatura:

Premissa VII: O sistema é separado de acordo com seus modos de falha, pois cada modo de falha tem características e consequências distintas. Que por sua vez facilita o agendamento das atividades de inspeção com intuito de minimizar os impactos da falha. Esta premissa foi considerada por Andrawus et al. (2008).

Premissa VIII: Considera que cada modo de falha é independente, portanto cada um pode ser quantificado por diferentes critérios. O que é justificado pela abordagem FMEA que considera que cada modo de falha tem um efeito potencial, e alguns efeitos são mais prováveis de ocorrer do que outros. Além disso, cada efeito potencial tem um impacto relativo associado.

Premissa IX As inspeções são programadas para cada modo de falha, em vez de para cada componente individual ou para o sistema como um todo, assim cada modo de falha deve ser analisado individualmente, gerando um intervalo de inspeção. Esta premissa foi utilizada por Andrawus et al. (2008).

Premissa X: O modelo não incluiu a presença de inspeções oportunas, por está analisando modos de falhas diferentes com diferentes consequências.

Uma vez definidas as premissas básicas do modelo é possível estruturar os critérios. Primeiro é necessário identificar a distribuição do *delay-time*, neste caso $f(h,m)$. A função de distribuição de probabilidade *delay-time*, $f(h,m)$, a exemplo de uma distribuição Weibull, como mostrado na Equação 9.

$$f(h, m) = \frac{\beta_m}{\phi_m} \left(\frac{h}{\phi_m}\right)^{\beta_m-1} e^{-\left(\frac{h}{\phi_m}\right)^{\beta_m}} \quad [9]$$

A probabilidade do defeito se transformar em falha é dada pela Equação 10, adaptada de Christer (1999), que representa a probabilidade do *breakdown* de acordo com o modo de falha, m :

$$b(T, m) = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{\infty} r_m (1 - r_m)^n \int_0^T F(nT - u, m) du \quad [10]$$

Onde,

$$F(x, m) = \int_0^x f(h, m) dh;$$

m - número referente ao modo de falha

Outro fator considerado é a redundância no sistema, representado por θ_m . Este fator foi proposto por Pillay (2003) e indica a existência de um sistema redundante que evita a consequência do *breakdown* decorrente de um modo de falha.

Em modos de falha críticos, onde o *breakdown* tem consequências graves, geralmente são associados sistemas de proteção para mitigar as falhas, ou seja, o modo de falha só irá ocasionar as consequências do *breakdown*, no caso em que os sistemas de proteção falharem. Sendo assim, este fator é multiplicado ao $b(T,m)$ para quantificar a redução na probabilidade de ocorrência do *breakdown*; entretanto, o sistema de proteção previne a ocorrência do *breakdown* e não do defeito, onde os defeitos continuarão a chegar e poderão ser identificados na inspeção.

O dispositivo de segurança, θ_m , tem um probabilidade de falha que varia entre 0 e 1. Nos casos que não houver um dispositivo de segurança associado ao modo de falha, então o

valor padrão 1 deve ser atribuído ao fator de redundância. Uma vez definida a probabilidade do *breakdown*, $b(T, m)$ é possível modelar os critérios. Tais critérios serão descritos a seguir.

Critério Custo

O custo esperado por unidade de tempo de referente a um modo de falha sob um regime de inspeção em intervalos fixos pode ser descrito pela probabilidade de um defeito decorrente de um MF se transformar em um *breakdown* mais a probabilidade do defeito ser identificado e reparado na inspeção que é dado por $1 - b(T)$. O custo por unidade de tempo é representado na Equação 11.

$$C(T, m) = \frac{[k_m T \{CB_m b(T, m) \theta_m + CIR_m (1 - b(T, m))\} + CI_m]}{T + d_m} \quad [11]$$

Onde $CI_m < CIR_m < CB_m$, que pode ser justificado pelas tarefas de inspeção levadas em consideração são atividades simples, enquanto que as tarefas de manutenção preventiva em defeito são operações mais complexas que envolvem reparos e substituições de componentes. Por isso, é razoável assumir que $CI_m < CIR_m$. Além disso, as atividades de manutenção corretiva custam mais do que as tarefas de manutenção preventivas, sendo assim $CIR_m < CB_m$.

Critério Downtime

Para estimar o *downtime* são necessários dados de cada modo de falha, que serão utilizados para gerar valores de *downtime* esperado ($D(T, m)$) para cada período de inspeção. De acordo com Pillay et al. (2001) para modelar o *downtime* de cada modo de falha do sistema será necessário conhecer: O *downtime* relacionado à inspeção do modo de falha, d_m e o *downtime* devido à ocorrência do *breakdown* relacionado ao modo de falha, db_m . Conhecidos os tempos, o *downtime* esperado é descrito pela Equação 12.

$$D(T, m) = \frac{d_m + k_m T b(T, m) db_m \theta_m}{T + d_m} \quad [12]$$

Critério Reputação

Para modelar o impacto dos modos de falhas na reputação da empresa foi considerado que as falhas decorrentes dos modos de falha podem ter um impacto negativo sobre a reputação e, como tal, este critério tem o objetivo de determinar o intervalo de tempo para

realizar a inspeção com objetivo de reduzir os impactos na reputação da empresa. Este critério foi utilizado por Emovon et al. (2016) no contexto de inspeção em sistema naval.

A reputação é representada pela Equação 13 que mede o impacto da falha decorrente do modo de falha na reputação e, portanto deverá ser minimizado. Neste sentido, a Equação 13 representará a quantidade de defeitos esperada até o tempo T, multiplicada pela probabilidade da falha e do defeito. Esta probabilidade do impacto é dada pela multiplicação da probabilidade de ocorrência do evento pelo seu respectivo impacto, Rb_m ou Ri_m .

$$R(T, m) = \frac{k_m T [b(T, m) Rb_m \theta_m + Ri_m (1 - b(T, m))]}{T + d_m} \quad [13]$$

Sendo necessário quantificar os parâmetros Rb_m , que representa o impacto na reputação em caso de ocorrência da falha decorrente do MF e Ri_m referente impacto na reputação no caso em que o defeito decorrente do MF ser reparado na inspeção. A Tabela 4.1 relaciona os valores do impacto na reputação e sua descrição.

Tabela 4.1 – Impacto na reputação

Gravidade	Descrição
1	Impacto mínimo - sem impacto externo na reputação
2	Impacto de curta duração e/ou natureza prevista
3	Impacto local - impacto de curta duração e/ou natureza inesperada
4	Impacto regional – Impacto de duração considerável e/ou natureza prevista
5	Impacto nacional – Impacto de duração considerável e/ou natureza inesperada

Fonte: Adaptado de Bertolini et al. (2009).

O valor atribuído a esta escala deverá ser obtido por especialistas em função da duração e do alcance do impacto gerado na reputação pela ocorrência do *breakdown*. O valor

atribuído a Rb_m deve necessariamente ser maior que Ri_m uma vez que o impacto do *breakdown* é maior que o do defeito.

Critério Impacto ambiental

No intuito de modelar como a política de inspeção pode impactar no meio ambiente, deve-se quantificar a gravidade do impacto ao ambiente. O critério ambiental é demonstrado na Equação 14 e foi adaptado a partir do modelo de Jones et al. (2009). Esta equação é uma função da ocorrência da falha e do defeito, e seus respectivos impactos. Sendo considerado o fator de reversão, que indica em quanto tempo este impacto poderá ser revertido ao estado semelhante ao anterior da falha/defeito.

$$E(T, m) = \frac{k_m T [ER_m b(T, m) \theta_m + EAI_m (1 - b(t, m))]}{T + d_m} \quad [14]$$

$$ER_m = \frac{EA_m}{1 - FR_m} \quad [15]$$

Os valores de EA_m e EAI_m são representados em uma escala ordinal de 1-5 e devem respondidos por especialistas. Sendo 1 o melhor valor possível e 5 o pior valor possível, conforme a Tabela 4.2, onde $EA_m > EAD_m$.

Tabela 4.2 - Índices de impacto ambiental

Índices	Descrição
1	Sem impacto perceptível
2	Impacto de magnitude desprezível/restrito ao local de ocorrência ³
3	Impacto de magnitude considerável/restrito ao local de ocorrência direta ⁴
4	Impacto de magnitude considerável/restrito as áreas de influência indireta ⁵
5	Impacto de grande magnitude/estendendo-se além da área de influência indireta, atingindo áreas ambientalmente sensíveis

Fonte: Adaptado de Bertolini et al. (2009)

Os valores de impacto ao ambiente são quantificados com relação à magnitude do impacto e área de influência. O fator, FR_m é um fator relativo ao tempo de limpeza/reversão do impacto podem ser atribuídos valores de acordo com a Tabela 4.3.

³ AIA (área de influência da atividade) - Área de operação do equipamento em si/suscetível a sofrer impactos decorrentes da operação.

⁴ AID (Área de Influência Direta)- Conjunto das áreas potencialmente suscetíveis a sofrer impactos diretos decorrentes da operação.

⁵ AII (Área de Influência Indireta) - Conjunto das áreas, que são potencialmente suscetíveis a sofrer impactos provenientes de fenômenos secundários, ou seja, não decorrentes diretamente da atividade em si.

Tabela 4.3- Fator relativo à quantidade de tempo necessário para limpar um acidente ambiental ocasionado por uma falha

Tempo de limpeza	Fator	Classificação
0-4 semanas	0,1	Baixo
1-3 meses	0,2	
3-12 meses	0,3	
1-3 anos	0,4	Médio
3-7 anos	0,5	
7-10 anos	0,6	
10-25 anos	0,7	Alto
25- 50 anos	0,8	
50-100 anos	0,9	Muito alto
Mais de 100 anos	1	

Fonte: Adaptado de Jones et al. (2009)

Assim como Jones et al. (2009) a Equação 15 torna-se indefinida se o período de tempo de limpeza é de mais de 100 anos, isto é, quando FR_m é 1. Esta quantidade de tempo é impraticável para fins do estudo, uma vez que é, obviamente, uma falha grave e fora do âmbito do presente modelo.

Critério Qualidade

Defeitos menores podem influenciar a qualidade do produto, mas defeitos maiores podem levar à falha do processo, além da qualidade do produto Wang (2009).

Com o objetivo de mensurar como a política de manutenção adotada pode afetar na percepção de qualidade, este critério considera a percepção de qualidade através da medição do grau de satisfação do usuário. Segundo Costa et al. (2007) este é um dos procedimentos mais utilizados para avaliar e classificar a qualidade de serviços.

Assim foram atribuídos parâmetros para classificar e quantificar quanto à ocorrência do *breakdown* ou do defeito corrigido na inspeção pode afetar o grau de satisfação do cliente. O *breakdown* dos sistemas pode ter um impacto negativo sobre a qualidade percebida pelo

cliente e, como tal, este modelo ajuda a determinar o intervalo de tempo mais apropriado para realizar a inspeção com a intenção de reduzir os impactos percebidos pelo cliente, as quais estão descritas na Equação 16.

$$Q(T, m) = \frac{k_m T [b(T, m) Q b_m \theta_m + Q i_m (1 - b(T, m))]}{T + d_m} \quad [16]$$

Os parâmetros $Q b_m$ e $Q i_m$ representam, respectivamente, a qualidade percebida pelo cliente no caso da ocorrência de uma falha do modo de falha m e a qualidade percebida pelo cliente no caso em que o defeito decorrente do MF. Esta escala de avaliação esta descrita na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Mensuração da qualidade percebida

Fator de penalidade aplicada	Descrição
1	Os clientes provavelmente não terão conhecimento
2	Leve aborrecimento do cliente
3	Insatisfação do cliente
4	Alto grau de insatisfação
5	Afeta as normas estabelecidas em contrato

Fonte: Esta Pesquisa (2017).

Os valores de $Q b_m$ e $Q i_m$ são representados em uma escala ordinal de 1-5 e são aplicadas por especialistas. Sendo 1 o melhor valor possível e 5 o pior valor possível. $Q b_m$ deve ser maior que $Q i_m$.

Critério Saúde e Segurança do Trabalhador

Uma política de inspeção adequada pode evitar consequências mais severas de falhas. De acordo com Khan & Amyotte (2005) uma abordagem mais segura tenta evitar ou eliminar os perigos ou reduzir a sua magnitude e gravidade através da minimização da probabilidade de ocorrência. Aven & Castro (2009) utilizaram restrições de segurança para otimizar um modelo de inspeção com base no conceito *delay-time*.

Para descrever a criticidade relacionada à saúde e segurança por modo de falha a equação 17 adaptada de Pillay & Wang (2003).

$$SS(T, m) = \frac{k_m T b(T, m) SS_m \theta_m}{T + d_m} \quad [17]$$

Onde $b(t, m)$ representa a probabilidade de um defeito, com taxa de chegada k_m , resultar em uma falha. Em seguida, SS_m representa a criticidade da segurança do referido modo de falha, m . O impacto decorrente do defeito decorrente do modo de falha que foi reparado na inspeção foi considerado imperceptível para a saúde e segurança do trabalhador. A variável SS_m mede os possíveis impactos de uma falha para a saúde e segurança do trabalhador e será classificada segundo a tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Impactos a saúde e segurança do trabalhador

Índices	Descrição
1	Medicação ou ferimentos com possível ausência do trabalho de 1 e 3 dias; Desconforto na realização de trabalhos
2	Lesão ou doença, com perda de capacidade de trabalho e possível ausência do trabalho por até 10 dias
3	Lesão ou doença ocupacional com perda de capacidade de trabalhar por um período de até 30 dias ou doença ocupacional com consequências reversíveis
4	Prejuízo para mais de uma pessoa; Lesão com perda de capacidade de trabalho por um período de mais de 30 dias e com risco de lesões múltiplas causadas pelo mesmo evento inicial; Inclui quaisquer impedimentos físicos ou problemas de saúde permanentes
5	Possibilidade extrema de morte a indivíduos ou grupos devido ao mesmo evento

Fonte: Adaptado de Bertolini et al (2009)

Os valores de impactos a saúde e segurança são atribuídos em função da consequência e do período para reversão que as falhas podem ter para os trabalhadores.

Após os critérios definidos seguindo os passos previstos na etapa 3, deve-se realizar o levantamento dos parâmetros de acordo com cada modo de falha. Com todos os dados coletados e documentados, segue-se com a análise de cada critério no diagrama de decisão. Esta análise consiste em minimizar os impactos para cada MF, encontrando assim uma métrica da consequência para cada critério em cada MF. Nesta etapa deve-se também verificar a ocorrência de conflito entre os critérios.

A etapa 4 consiste na otimização numérica para os casos em que apenas um critério foi selecionado o critério deve ser modelado e em seguida a otimizado numericamente.

Se os critérios forem conflitantes segue-se para etapa 5 que consiste na utilização dos métodos multicritério. Quando não existe conflito entre os critérios, segue-se para a etapa 6 onde os resultados devem ser analisados.

Para os casos em que o diagrama lógico resultou em mais de um critério e estes são conflitantes deve ser seguida a etapa 5, esta teve como base de Almeida et al. (2015). Primeiramente, a estrutura de preferências deve ser identificada, pois irá influenciar na escolha do método multicritério a ser utilizado. Um ponto importante, destacado por Guitouni & Martel (1998), é o estabelecimento da racionalidade que mais se adapta ao decisor no problema estudado, esta pode variar entre o uso da abordagem compensatória ou não compensatória.

As abordagens compensatórias permitem que um mau desempenho em uma alternativa ou em mais critérios possa ser compensado por um bom desempenho em outros (French et al., 2009). Já na abordagem não compensatória, segundo Dieckmann & Dippold (2009) um atributo com baixo desempenho não pode ser compensado por qualquer combinação de atributos com maior desempenho. Depois desta etapa a seleção método a ser utilizado é realizada.

O método escolhido determinará como será realizada a avaliação intracritério, que de acordo com de Almeida (2013) consiste na avaliação de cada alternativa para cada critério. Como resultado desta avaliação intracritério, é possível representar o problema através de uma matriz de decisão que irá demonstrar os valores obtidos de cada alternativa para cada consequência, também conhecida como matriz de consequências, matriz de impacto, matriz de avaliação ou matriz de decisão.

Em seguida deve-se efetuar a parametrização do método, obtendo as informações intercritério, junto ao decisor. Estas tratam-se das informações que permitem efetuar a

combinação quantitativa dos critérios para o processo de agregação com vistas à avaliação de alternativas (de Almeida, 2013).

Estas informações intercritério podem ser nomeadas como constante de escala ou como pesos. De acordo com Riabacke et al., (2012) o peso atribuído a um critério é basicamente um fator que associa uma pontuação para este critério em relação a todos os outros critérios.

Após realizar as análises intracritério e intercritério, deve-se avaliar as alternativas e determinar intervalo de inspeção para os modos de falha que melhor representa a preferência do decisor. Sendo, possível elaborar uma recomendação para solução do problema.

4.2 Considerações finais do capítulo 4

O capítulo 4 teve como principal objetivo a estruturação do problema de gerenciamento de manutenção e o desenvolvimento de um modelo para sistemas complexos que levasse em consideração diferentes critérios, o conceito *delay-time* e a análise dos modos de falha.

Com este objetivo, foi desenvolvido um modelo híbrido entre a uma técnica de otimização quantitativa de manutenção (abordagem *Delay-time*) e uma técnica qualitativa para a seleção de tarefas de manutenção de ativos físicos (FMEA - Failure Modes and Effect Analysis), o qual a partir da análise dos resultados foi possível demonstrar o impacto diferentes critérios no intervalo de inspeção. Foi levado em consideração também que nem todos os modos de falha impactam o sistema em todos os critérios e neste sentido foi proposto um diagrama lógico de decisão para estruturação de quais critérios vão ser levados em consideração para cada modo de falha, m . O modelo utiliza um método de análise de decisão multicritério para análise conjunta dos critérios. Nesta perspectiva, no capítulo a seguir é apresentado a aplicação do modelo, bem como a discussão sobre os resultados obtidos em relação ao intervalo entre inspeções.

5. APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO EM UMA USINA TERMOELÉTRICA

Neste capítulo objetiva-se demonstrar os resultados obtidos através da aplicação do modelo desenvolvido no capítulo anterior e a interpretação destes resultados, onde o propósito do modelo foi combinar a avaliação dos modos de falha (MF) de um sistema, a seleção dos critérios que melhor representam cada dimensão dos modos de falha e o processo de determinar o melhor intervalo para as inspeções através de uma abordagem multicritério.

Para demonstrar a aplicabilidade do framework proposto, foi realizado um estudo em uma usina de geração de energia termoeletrica com motores á óleo.

5.1 Contextualização das decisões de manutenção em uma usina termoeletrica

A manutenção eficaz dos sistemas geradores de energia é muito importante para o funcionamento econômico e confiável de um sistema de energia. Dahal & Chakpitak (2007) afirmam que a manutenção é vital para o planejamento das operações de um sistema de energia, já que existem atividades de planejamento de curto e longo prazo que são diretamente afetados pelas decisões de manutenção, tais como o compromisso de geração, a quantidade de geração despachada, importação/exportação de energia e o planejamento de expansão da geração. A manutenção nestes casos é planejada a fim de evitar o envelhecimento precoce e a insuficiência dos geradores, que podem levar a quedas de energia não planejadas.

O sistema para geração de energia envolve grande investimento de capital para aumentar a confiabilidade do sistema. A manutenção adequada desses sistemas e a frequência de manutenção são algumas das questões que estão ganhando importância neste setor. O sistema é afetado pela falha de qualquer sistema intermediário mesmo que por um intervalo pequeno de tempo (Gupta et al. , 2009a).

Kralj & Petrović (1988) destaca as especificidades do gerenciamento de manutenção de unidades térmicas que estão relacionadas às características do sistema de energia, tais como:

(a) Impossibilidade de armazenar a energia elétrica gerada (em cada energia gerada instantaneamente deve ser igual à demanda). O que implica que qualquer falha que gere indisponibilidade pode ser diretamente percebida pelo cliente.

(b) Capacidade limitada da rede de transmissão (De modo que em cada instante em cada sistema apenas a quantidade necessária de energia deve ser gerada),

(c) Necessidade de garantir uma quantidade adequada de capacidade de reserva

(d) É um sistema complexo com diversos componentes e subsistemas interconectados. Decisões de manutenção para subsistemas individuais podem ter impacto negativo sobre outro sistema, sendo de fundamental importância tratar o sistema de maneira unificada para que todos os subsistemas atendam aos mesmos objetivos.

A programação de manutenção de unidades geradoras deve ser otimizada em termos de uma função objetivo. A seleção de objetivos depende de necessidades específicas. Existem geralmente duas categorias de objetivos nos problemas de programação de manutenção para sistemas de energia: com base nos custos ou lucro e com base na confiabilidade (Bisanovic et al, 2011).

A literatura contém um corpo sólido de trabalho focado em melhorar a tomada de decisão de manutenção em unidades de geração (Froger et al, 2015). Com o intuito de revisar os principais objetivos utilizados na tomada de decisão em unidades geradoras utilizou-se como referência a pesquisa de Froger et al. (2015), que apresentou uma revisão de literatura de trabalhos destinados a tomada de decisões de agendamento de manutenção em unidades geradoras e linhas de transmissão.

Na Tabela 5.1 são apresentados os principais critérios de otimização empregados para decisões de manutenção de usinas geradoras, quantificando a utilização destes critérios como demonstrado em Froger et al. (2015)

Tabela 5.1 - Critérios utilizados na otimização da Manutenção de Usinas Geradoras

CRITÉRIOS UTILIZADOS NO ARTIGO	QUANTIDADE
Custo	36
Confiabilidade	16
Lucro	4
Custo e Confiabilidade	6
Confiabilidade e Lucro	8
Custo e Lucro	2
Total	72

Fonte: Adaptado de Froger et al.(2015)

Observa-se a partir da Tabela 5.1, que a maioria dos artigos na área de geração de energia utilizam como critérios o custo, representando 50% do total, e a confiabilidade, aproximadamente 22% do total. A utilização conjunta destes dois critérios representou 8,33%. O critério lucro apareceu em 8,33% dos casos. Para mais detalhes, ver Froger et al. (2015).

A Tabela 5.1 apresentou os principais critérios utilizados na literatura para representar as decisões de manutenção em usinas geradoras de energia, entretanto o ambiente de decisões pode envolver outros objetivos ainda não explorados.

5.2 Aplicação do Framework Proposto

Para realização da primeira etapa do framework, foi realizado um estudo junto ao gerente de manutenção da planta que foi o decisor para implementação do modelo. O decisor é responsável pelas decisões de operações, e manutenção da planta estudada. Possui mais de 7 anos em gerenciamento de unidades elétricas e é especialista na área de gerenciamento de plantas geradoras de energia.

A central termoeétrica estudada é composta por 10 unidades motogeradoras de ciclo diesel abastecidas com óleo combustível especial e sendo prevista a utilização de óleo diesel como combustível alternativo, gerando uma capacidade total instalada de 164000 kW com consumo interno de 5.740 kW. Os geradores elétricos são do tipo síncrono de três fases e tem potência de 21.345 kVA. Os motores são a pistão com ciclo térmico simples com 18 cilindros e uma potência de 17.076 kW. É interligada no sistema nacional de energia. As unidades

motogeradoras e seus equipamentos auxiliares necessitam de um bom planejamento de manutenção, pois devem garantir que os sistemas e subsistemas se mantenham em condições operacionais, além de garantir a qualidade das emissões atmosféricas inerentes à queima do combustível fóssil.

A seleção do sistema a ser estudado, surgiu da necessidade do decisor em determinar o intervalo entre as inspeções, no sistema auxiliar do motor da unidade geradora. Foi verificado que ao realizar a inspeção em um único período para todo o sistema, parte dos subsistemas encontravam-se no estado normal no momento da inspeção enquanto outros falhavam antes ou pouco depois do período de inspeção. Onde os modos de falha têm características distintas e que alguns têm consequências mais severas do que outros.

O sistema de equipamentos auxiliares da unidade geradora selecionado para análise consiste na centrífuga separadora. A centrífuga separadora tem como função principal a remoção de partículas de uma corrente de ar, gás ou líquido, sem a utilização de filtros, através de vórtice separação (LIU et al., 2012). Para a separação do óleo das impurezas um hidrociclone é utilizado. O processo utiliza a diferença de força centrífuga para conseguir a separação. A água mais pesada é jogada para a fronteira onde é drenada, espirais descendentes jogam as impurezas pela saída de borras, enquanto o óleo mais leve sai pela porta de saída de óleo limpo para alimentar os motores (Zeng et al., 2016).

Para a divisão do sistema de acordo com os modos de falha utilizou-se a metodologia FMEA apresentada por Moubay (1997) a qual primeiro um especialista identificou as funções críticas do equipamento e em sequência analisaram cuidadosamente os modos de falha. O especialista foi o próprio decisor. Foram identificados quatro modos de falhas críticos, descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Modos de falha

Equipamento: Centrífuga Separadora			
Função Principal	Função secundária	Modos de Falha	m
Fornecer óleo limpo para o motor de combustão da unidade geradora	Separar o óleo de partículas sólidas e de água	Não separar o óleo de partículas sólidas e de água	I
	Aquecer o óleo para fornecer à separadora	Superaquecer o óleo ao fornecer para separadora	II
	Bombear o óleo para a separadora	Bombear o óleo para a separadora fora dos padrões de pressão	III
	Controlar a velocidade de rotação da separadora	Aumentar significativamente a velocidade de rotação da separadora	IV

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Foram identificados quatro modos de falhas distintos e independentes. Tendo identificado os modelos de falhas é possível seguir para etapa 2 do Framework que consiste no diagrama de decisão para identificar quais os critérios que são afetados por cada modo de falha.

Primeiro os critérios foram contextualizados no problema de decisão de manutenção das usinas termoelétricas, para que o decisor compreendesse a importância de se considerar cada um dos critérios na modelagem de manutenção.

Critério - Downtime

De acordo com Kumar & Pandey (1993), para um funcionamento eficiente de uma usina térmica, é essencial que os sistemas da planta permaneçam no estado disponível. Para obter uma geração regular e econômica de energia elétrica, uma planta deve ser mantida a um nível de disponibilidade alta que corresponderá a um custo global mínimo (Gupta et al, 2008).

Esta é uma das medidas mais utilizadas para medir o desempenho em unidades geradoras. O *downtime* é a proporção do tempo que o equipamento/planta permanece em estado indisponível do tempo total em que a unidade está em serviço. Para a previsão do *downtime*, vários modelos são encontrados na literatura que auxiliam a defini-lo (Gupta et al, 2009b).

O *downtime* é uma boa medida do desempenho de um sistema. Os seus valores dependem da estrutura do sistema, bem como da disponibilidade e da confiabilidade dos componentes. Esses valores aumentam à medida que a idade do componente aumenta - isto é,

seus tempos de serviço são influenciados por interações mútuas, pela política de manutenção aplicada e pelo ambiente (Gupta et al., 2008).

Critério – Custos

Minimizar os custos é o objetivo de todas as organizações. Um problema de manutenção é geralmente resolvido com o objetivo de satisfazer a demanda a um custo mínimo (Froger et al., 2015).

Canto (2008) utiliza o custo como função de otimização da gestão da manutenção de usinas geradoras e os classifica em três principais tipos: Os custos de startup, que compreendem o custo de colocar um gerador em funcionamento depois de ser desligado; Custo de produção, que se refere ao custo de produção de 1MWh em um gerador e o custo de manutenção, que é o custo para colocar um gerador em manutenção preventiva.

As ações de manutenção são essenciais para o funcionamento da usina, conseqüentemente os custos associados diretamente a essas ações influenciam nos custos totais e devem ser minimizados.

A minimização da ocorrência de falhas resulta na redução dos custos de manutenção, pois a ocorrência da falha acarreta em custos diretos (mão-de-obra para colocar o equipamento em operação, peças e equipamentos envolvidos, elevação do consumo de combustível) e custos secundários (relacionados a possíveis falhas ocasionadas em equipamentos ou componentes devidos a falha súbita de outro).

Como a energia não pode ser armazenada, pelo menos a um custo aceitável, a geração de energia deve equilibrar instantaneamente a demanda. Planejar a operação de um sistema de energia requer a previsão da demanda de longo prazo e entender o mix de capacidade de geração disponível para atender as demandas (Fourcade et al, 1997). As unidades de geração são limitadas por condições que estão diretamente ligadas á ações eficazes de manutenção, sendo essencial para minimização dos custos e maximização dos lucros.

Ações de manutenção corretiva e preventiva têm suas vantagens e desvantagens, portanto é essencial para redução de custos de manutenção que sejam realizados estudos para o balanceamento das atividades de manutenção preventiva e corretiva, propondo intervalos de manutenção preventiva que garantam que os equipamentos não cheguem a falhar resultando em maiores custos. Fonseca-Junior et al (2015) acrescenta que a gestão da manutenção procura reduzir custos associados à manutenção, em particular horas/homem e custos de reparo.

Critério – Impactos ambientais

Para usinas termoeletricas é muito comum que se associe uma maior agressão ao meio ambiente. Altas tecnologias são investidas para que estes impactos sejam minimizados. Assim devem ser seguidas as regulamentações ambientais e tomados todos os cuidados para que este impacto seja minimizado.

Acidentes ambientais podem ser simples, mas também podem ser graves o suficiente para danificar o meio ambiente por muitos anos. Muitas vezes este tipo de acidente é difícil, se não impossível reverter, agravando a importância de evitar tais falhas de equipamentos ou componentes.

O cenário global mudou com o setor privado cada vez mais consciente da responsabilidade ambiental. Essa consciência tem levado à expansão da estrutura tradicional focada no desempenho financeiro para incluir tanto os aspectos sociais como ambientais (Biermann et al., 2012). Incluindo no ambiente de manutenção uma gestão cuidadosa do consumo de recursos, bem como na produção e eliminação de resíduos.

Neste sentido, Van Horenbeek et al, (2014) discutem que as reduções do impacto ambiental decorrentes de uma boa manutenção, geram interesse de investigação na integração dos aspectos ambientais na gestão da manutenção.

Critério – Reputação

Grandes empresas são reconhecidas pela sua reputação no mercado. Falhas com grandes impactos seja no ambiente ou na saúde e segurança dos trabalhadores, ocasionam grandes perdas monetárias em consequência da desvalorização da reputação da empresa, não afetando apenas na reputação da empresa com seus clientes diretos, mas também com o público em geral, a depender da proporção da falha.

O impacto na reputação pode afetar economicamente as empresas, grandes desastres ambientais ocasionados por alguma falha no processo podem vir a conhecimento nacional e internacional, acarretando em grandes prejuízos. Devido às proporções que podem ser geradas com um acidente em uma usina termoeletrica, esta é uma preocupação constante do decisor de manutenção.

Um acidente em uma usina termoeletrica pode interromper o fornecimento de serviços públicos e residenciais, criar engarrafamentos e o fechamento de empresas. As falhas podem

expor as organizações a um grande conjunto de impactos, seja individual ou coletivo que podem afetar a reputação da usina termoeétrica.

Uma boa reputação fortalece a posição de mercado da empresa, aumentando assim o valor para o acionista; portanto, pode gerar grande recompensa para a empresa. Neste sentido, Fragouli & Ekruka (2016) ressaltam que a reputação de qualquer empresa no mundo dos negócios é uma questão importante, pois uma vez perdida, é o bem mais difícil de recuperar.

Este nem sempre foi o foco das organizações, principalmente ao relacionar as atividades de manutenção, entretanto devido à natureza complexa do ambiente de negócios, os impactos na reputação devem ser identificados, mitigados, controlados e monitorados.

Critério – Saúde e segurança do trabalhador

Os benefícios de ter um ambiente de trabalho saudável e seguro são amplamente reconhecidos. Assim Antão et al. (2016) destaca que muitos estudos na área de saúde e segurança concluem que as condições de trabalho adequadas têm o potencial para aumentar a produtividade e, conseqüentemente, melhorar o desempenho operacional das organizações. Outros benefícios importantes são que os custos sociais e econômicos dos acidentes ocasionados por falhas podem ser reduzidos.

As falhas podem levar a conseqüências não só nos equipamentos, como também expor os trabalhadores a situações perigosas, acidentes e problemas de saúde. A manutenção quando realizada de maneira eficaz é de fundamental importância não só para garantir as condições do equipamento, mas também para manter as condições de saúde e a segurança ocupacional.

Uma política de inspeção adequada pode evitar conseqüências severas de falhas. De acordo com Khan & Amyotte (2005) uma abordagem mais segura tenta evitar ou eliminar os perigos ou reduzir a sua magnitude e gravidade através da minimização da probabilidade de ocorrência. Aven & Castro (2009) utilizaram restrições de segurança para otimizar as decisões de inspeção de manutenção.

Um acidente em usinas termoeétricas geralmente tem conseqüências severas, podendo levar a dezenas de mortes e feridos. Por isto, este objetivo deve ser uma preocupação a ser considerada nas decisões de manutenção, uma vez que a perda ou dano a vidas humanas não pode ser medida somente em termos monetários.

Critério – Qualidade

Em sistemas de produção contínuos, caso das usinas termoelétricas, a interrupção ocasionada por alguma falha nos equipamentos é diretamente percebida pelo cliente. Segundo Costa et al. (2007) um dos procedimentos mais utilizados para avaliar e classificar a qualidade de serviços é a percepção do cliente. Alguns especialistas consideram que a satisfação do consumidor, é um dos melhores indicadores de lucros futuros de uma organização (Brecka, 1994).

As interrupções são o principal atributo que o cliente percebe com relação à qualidade no caso das usinas termoelétricas. O cliente da usina estudada é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que é responsável pela transmissão da energia e o controle das operações. Este órgão é comumente encontrado em diferentes países. A ANEEL determina uma penalidade para interrupções no serviço. De maneira semelhante à agência reguladora da Espanha determina indicadores para o objetivo qualidade do serviço, assim como a faixa de valores, para satisfazer um nível de usuário individual. Estes índices consideram a continuidade do fornecimento, o número relativo e a duração das interrupções e da qualidade do produto relativo às características da tensão. Outras agências reguladoras também consideram este indicador.

Portanto, torna-se essencial para o decisor incluir o critério qualidade. Casos de indisponibilidade podem além de acarretar em multas, influenciar a percepção de qualidade do cliente.

Os questionamentos presentes do diagrama da Figura 4.2 – Diagrama Lógico para selecionar quais critérios foram utilizados foram realizados junto ao decisor.

Os resultados estão descritos na Tabela 5.3. Os campos marcados com um “x” na tabela indicam que a resposta a pergunta foi “SIM”, e conseqüentemente, que este critério deve ser usado na modelagem de inspeção para o modo de falha.

Tabela 5.3– Respostas diagrama Lógico

Modo de falha, <i>m</i>	Questões do diagrama de decisão					
	Tem impacto significativo nos custos?	Provoca interrupção no processo?	É prejudicial à saúde e segurança do trabalhador?	É prejudicial ao meio ambiente?	Tem consequências perceptíveis ao público em geral?	É percebida pelo cliente direto?
I	X	X		X		
II	X	X	X			
III	X	X		X		
IV	X	X	X	X	X	

Fonte: Esta Pesquisa (2017).

O modo de falha I tem impacto nos custos, no *downtime* e no ambiente, estes critérios serão modelados de acordo com as Equações 11,12 e 14, respectivamente. Já os impactos referentes ao modo de falha II, além de ter impacto nos custos e no *downtime*, têm consequências para a saúde e segurança. Tais critérios serão representados respectivamente pelas Equações 11, 12 e 17. Uma falha ocasionada pelo modo de falha III será descrita através dos custos (Equação 11) e do *downtime* (Equação 12), assim como também poderá influenciar no impacto ambiental (Equação 14). Por fim, o modo de falha IV que tem impactos na saúde e segurança do trabalhador, no meio ambiente, nos custos, no *downtime* e na reputação serão modelado de acordo com as Equações 17, 14, 11, 12 e 13, respectivamente.

Definindo quais os critérios serão utilizados e as suas respectivas modelagens, de acordo com a etapa 3 do framework os parâmetros precisam ser conhecidos para avaliar as alternativas para cada modo de falha e verificar a ocorrência de conflitos. Os parâmetros foram encontrados junto aos dados históricos da centrífuga estudada conforme a Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros

Parâmetros	Modos de falha			
	I	II	III	IV
DS? (S) ou (N)	N	S	N	S
θ_m	1	0.1	1	0.1
β_m	2.5	2.41	2.1	2.8
$\Phi_m(h)$	5.000	4.900	4.800	4.700
r_m	0,92	0,92	0,92	0,92
$k_m(\text{defeito/h})$	0,000395	0,000732	0,000495	0,000482
Cb_m (R\$)	100.000	128.000	56.000	150.000
CR_m (R\$)	10.000	6.000	14.000	7.000
Ci_m (R\$)	4.000	4.000	4.000	4.000
db_m (h)	50	23	19	28
Di_m (h)	1	1	1	1
Rb_m				5
Ri_m				1
EA_m	4		5	5
FR	0,1		0,2	0,3
EAI_m	1		1	1
Qb_m				
Qi_m				
ISS_m		4		5

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

De posse dos parâmetros extraídos da Tabela 5.4 torna-se possível avaliar os critérios individualmente para verificar a existência de conflitos. As alternativas analisadas irão variar de acordo com comportamento de falha e em intervalos de 100 horas. O intervalo de avaliação do foi definido pelo decisor e variou entre 1000 a 4000 horas. A melhor alternativa para cada critério é demonstrado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Melhor tempo de cada critério para cada MF

Critérios	MF I	MF II	MF III	MF IV
Custo	1700 h	3200 h	1800 h	3500
Downtime	1300 h	2800 h	1400 h	3100
Reputação	1000 h			4000
Impacto Ambiental			1000 h	4000
Qualidade				
Saúde e Segurança		1000		1000

Fonte: Esta Pesquisa (2017).

É possível observar através da Tabela 5.5 a existência de conflito entre as alternativas no MF I, onde o ótimo para o custo é encontrado na alternativa de tempo 1700 horas difere do ótimo do critério *downtime*, 1300 horas, e o melhor valor do impacto ao meio ambiente, 1000 horas. Observa-se também um conflito entre as alternativas para o MF II. As melhores alternativas para cada critério avaliado estão em pontos distintos (3200, 2800 e 1000). Neste caso, portanto, é indicado o uso dos métodos de análise multicritério para resolução do problema que consiste na etapa 5 da metodologia.

No MF III o menor *downtime* é encontrado no intervalo de tempo de 1400 horas, entretanto neste tempo o custo e o impacto ambiental não são os melhores possíveis dentre o intervalo de alternativas considerado. Os mesmos obtêm seus melhores desempenhos nos pontos 1800 e 1000, respectivamente.

Para o modo de falha IV o ótimo para o critério C(T) foi encontrado em 3500, para o critério D(T), em 3100, para os critérios impacto ambiental e reputação a melhor alternativa foi no ponto comum 4000 e no critério segurança, em 1000 horas, tendo verificado que existe conflito entre os critérios deve-se seguir para etapa 5 do framework que consiste na utilização dos métodos multicritério para otimização conjunta dos tempos de inspeção.

A primeira etapa para aplicação da análise multicritério é a modelagem de preferências que resultará na escolha do método. No caso em estudo, foi verificado junto ao decisor que o

mesmo possui uma racionalidade não compensatória diante da situação problema e, portanto, o método PROMETHEE II foi escolhido para analisar o problema de decisão.

A primeira fase para aplicação do método inclui o enriquecimento da estrutura de preferência, isto é, descrever a intensidade de preferência de alternativa em alternativa, para um determinado critério, que é designado por $P_j(a, b)$ e recebe valores entre 0 e 1. No estudo o critério generalizado escolhido para todos os critério foi o tipo 1 (critério usual), que esta demonstrado na equação 1. Esta função indica que qualquer diferença entre performances nas alternativas representa uma preferência estrita.

Na segunda etapa, faz-se a exploração da relação de sobreclassificação. Para tal, utilizou-se a metodologia ROC (*Rank-Order Centroid*), utilizando a Equação 7 para atribuir pesos:

O W_i irá representar o peso atribuído a preferência do decisor com relação a cada critério, n é o número de critério, $j=1,2,\dots, n$ é a posição dos critérios no ordenamento, $i=1,2,\dots,n$ e $\sum W_i = 1$, $W_i \geq 0$. A ordem adotada no estudo de caso como a ordenação de preferência dos critérios fornecida pelo decisor e os pesos de acordo com a regra ROC estão descritas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Pesos ROC – Cenário 0

Modo de Falha	ORDEM	PESOS				
I	C(T) - D(T) - E(T)	C(T)	D(T)	E(T)		
		0,6111	0,2778	0,1111		
II	C(T) - D(T) - SS(T)	C(T)	D(T)	SS(T)		
		0,6111	0,2778	0,1111		
III	C(T) - D(T) - E(T)	C(T)	D(T)	E(T)		
		0,6111	0,2778	0,1111		
IV	C(T) - D(T) - SS(T)-E(T)- R(T)	C(T)	D(T)	SS(T)	E(T)	R(T)
		0,4567	0,2567	0,1567	0,09	0,04

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Para o MF I, a ordem de preferências dos critérios atribuída pelo decisor foi $E(T) < D(T) < C(T)$ e por este motivo aplicando a equação 7, referente aos pesos ROC, obtivemos o peso 0,6111 para o critério custo, 0,2778 para o critério *downtime*, e 0,1111 para o impacto ambiental.

O mesmo foi seguido para o MF II, onde a partir da ordem $SS(T) < D(T) < C(T)$, obteve-se os pesos de 0,1111, 0,2778 e 0,6111, para cada um desses critérios respectivamente.

Já para o MFIII o decisor ordenou sua preferências com relação aos critérios da seguinte maneira: Custo mais importante que *downtime* e *downtime* mais importante que impacto ambiental. Assim os pesos obtidos para estes critérios através da regra ROC foram respectivamente, 0,6111, 0,2778 e 0,1111.

No MF IV a ordem estabelecida foi $R(T) < E(T) < SS(T) < D(T) < C(T)$ e o peso foi de 0,4567 para o critério custo, 0,2567 para o critério *downtime*, 0,1467 para saúde e segurança e 0,09 para o impacto ambiental e 0,04 para a reputação.

Uma vez obtido o peso, determinamos o índice de preferência, o qual é definido e expresso pela equação 8. O fluxo líquido foi utilizado para ordenar as alternativas de tempo, onde o maior fluxo líquido representa a alternativa com a melhor posição no ranking. As alternativas que obtiveram o maior fluxo líquido para cada modo de falha, assim como o desempenho destas alternativas para os critérios são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7- Melhor alternativa para cada modo de falha

Desempenho da melhor alternativa para os critérios							
MF	Melhor fluxo líquido (h)	C(T)	D(T)	R(T)	E(T)	SS(T)	Q(T)
MF I	1400	7,100	0,001095		0,000382		
MF II	3100	6,325	0,000544			0,00004002	
MF III	1800	10,385	0,0011153		0,000649		
MF IV	3500	5,104	0,0004916	0,0004451	0,000869	0,00003678	

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Como o resultado do PROMETHEE II, exposto na Tabela 5.7, podemos indicar o período o qual as inspeções devem ser realizadas para cada modo de falha.

Para o modo de falha I que impacta no critérios custo, *downtime* e impacto ambiental, a recomendação é que as inspeções sejam realizadas em intervalos de 1400 horas, o que

equivale a aproximadamente 58 dias, devendo os componentes envolvidos neste MF serem inspecionados em média 6 vezes por ano. Ao realizar as inspeções no intervalo proposto para este MF, resulta em um custo esperado de R\$ 7,10 por hora, um *downtime* esperado de 0,001095 por hora que representa 9,59 horas paradas por ano e um impacto ambiental esperado de 0,000382.

A alternativa com melhor posição no ranking para o MF II foi encontrada no intervalo de tempo de 3100 horas. Este modo de falha está relacionado com o superaquecimento do óleo e por este motivo pode levar a consequências graves para saúde e segurança do trabalhador. Dispositivos de segurança estão associados a este MF no intuito de medir a temperatura do óleo e evitar as consequências do *breakdown* decorrente deste equipamento. Este dispositivo de segurança reduz a probabilidade de ocorrência do *breakdown* e por este motivo os intervalos de tempo entre inspeções ocorreram a cada 130 dias. O que representa um custo esperado anual de R\$ 55.407,00 e um *downtime* anual de 4,76 horas. O impacto a saúde e segurança neste caso foi de 0,00004002. Os resultados mostram que a melhor alternativa não representa a melhor disponibilidade. Quando os critérios são maximizados individualmente, os intervalos observados não levam a uma melhor escolha global.

O intervalo de inspeção indicado de acordo com a aplicação do PROMETHEE para o Modo de falha III é de 1800 horas que representa 75 dias, ocorrendo em média 4,86 vezes ao ano. Este intervalo representa um custo esperado por hora de R\$ 10,38, um *downtime* médio de 0,001115 por hora e um impacto ambiental de 0,000649. Anualmente isto irá custar R\$ 90.928,80 e resultará em um *downtime* médio anual de 9,76 horas.

O modo de falha IV, que representa o *breakdown* decorrente do aumento de velocidade de rotação da separadora, envolve consequências graves, tanto a saúde e segurança dos trabalhadores, como a reputação e ao meio ambiente. Com o intuito de minimizar os possíveis impactos um dispositivo de segurança é associado a este MF, o que reduz a probabilidade do *breakdown* chegar a acontecer. Diante deste cenário, a alternativa de intervalos de inspeção que obteve a melhor posição foi 3500 horas. Considerando este intervalo de inspeção tem-se anualmente um custo esperado de R\$44.711,04 e um *downtime* de 4,31 horas. Os impactos no critério ambiental, saúde e segurança e na reputação são de 0,0004451, 0,000869, 0,00003678, respectivamente.

Para estudar os efeitos dos pesos de cada critério, diferentes posições de ordem de preferência foram atribuídas ao decisor, com o intuito de realizar uma análise de

sensibilidade. Os pesos são analisados em quatro opções adicionais ao cenário inicial (0) no qual os resultados foram obtidos, estes foram:

Cenário inicial – Pesquisa: considerando o cenário obtido na aplicação da metodologia, descritos na Tabela 5.7;

Cenário1- Uniforme: considerando todos os pesos distribuídos igualmente, descritos na Tabela 5.8;

Tabela 5.8 – Pesos Cenário 1

Modo de Falha	ORDEM	PESOS				
I	C(T) - D(T) - E(T)	C(T)	D(T)	E(T)		
		0,3334	0,3333	0,3333		
II	C(T) - D(T) - SS(T)	C(T)	D(T)	SS(T)		
		0,3334	0,3333	0,3333		
III	C(T) - D(T) - E(T)	C(T)	D(T)	E(T)		
		0,3334	0,3333	0,3333		
IV	C(T) - D(T) - SS(T)-E(T)- R(T)	C(T)	D(T)	SS(T)	E(T)	R(T)
		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Neste cenário, os pesos foram distribuídos uniformemente. Para os casos onde os modos de falha impactam em três critérios, a cada um destes foi atribuído o peso de 0,3333 aproximadamente. O modo de falha IV que tem impacto em 5 critérios, recebeu os pesos de 0,2 para fins da avaliação deste cenário.

Cenário 2 – Pesos atribuídos diretamente: variação nos pesos atribuídos a cada critério mantendo a ordenação inicial, descritos na Tabela 5.9;

Tabela 5.9 – Pesos Cenário 2

Modo de Falha	ORDEM	PESOS				
I	C(T) - D(T) - E(T)	C(T)	D(T)	E(T)		
		0,5111	0,3278	0,1611		
II	C(T) - D(T) - SS(T)	C(T)	D(T)	SS(T)		
		0,5111	0,3278	0,1611		
III	C(T) - D(T) - E(T)	C(T)	D(T)	E(T)		
		0,5111	0,3278	0,1611		
IV	C(T) - D(T) - SS(T)-E(T)- R(T)	C(T)	D(T)	SS(T)	E(T)	R(T)
		0,4067	0,2817	0,1817	0,115	0,065

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

O cenário 2 analisou pesos atribuídos arbitrariamente, mantendo a ordem de preferência do decisor. Os pesos atribuídos nos modos de falha I, II e III os pesos atribuídos variaram entre 0,5111, 0,3278 e 0,1611 de acordo com a ordem de preferência. Para o modo de falha IV os pesos também foram atribuídos de acordo com a ordem de preferências, os valores dos pesos foram: 0,4067, 0,2817, 0,1817, 0,115 e 0,065.

Cenário 3- Inversão 1: maior importância a segunda posição da ordenação, descritos na Tabela 5.10;

Tabela 5.10 – Pesos Cenário 3

Modo de Falha	ORDEM	PESOS				
I	D(T) - C(T) - E(T)	D(T)	C(T)	E(T)		
		0,6111	0,2778	0,1111		
II	D(T) - C(T) - SS(T)	D(T)	C(T)	SS(T)		
		0,6111	0,2778	0,1111		
III	D(T) - C(T) - E(T)	D(T)	C(T)	E(T)		
		0,6111	0,2778	0,1111		
IV	D(T) - C(T) - SS(T)-E(T)- R(T)	D(T)	C(T)	SS(T)	E(T)	R(T)
		0,4567	0,2567	0,1567	0,09	0,04

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Neste cenário foi analisado o impacto da ordenação da preferência do decisor com relação aos critérios. Para isto, a ordenação dos critérios foi invertida e ao segundo critério foi atribuída a maior importância.

Cenário 4- Inversão 2: maior importância a terceira posição da ordenação, descritos na Tabela 5.11;

Tabela 5.11 – Pesos Cenário 4

Modo de Falha	ORDEM	PESOS				
I	E(T) - C(T) - D(T)	E(T)	C(T)	D(T)		
		0,6111	0,2778	0,1111		
II	SS(T) - C(T) - D(T)	SS(T)	C(T)	D(T)		
		0,6111	0,2778	0,1111		
III	E(T) - C(T) - D(T)	E(T)	C(T)	D(T)		
		0,6111	0,2778	0,1111		
IV	SS(T) - C(T) - D(T)-E(T)- R(T)	SS(T)	C(T)	D(T)	E(T)	R(T)
		0,4567	0,2567	0,1567	0,09	0,04

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

O cenário 4, analogamente ao cenário 3, analisou o impacto da ordenação de preferência do decisor. Para tal, ao terceiro critério da ordenação foi atribuído a maior importância.

Os resultados obtidos nas variações de peso sugeridas no cenário 1, 2, 3 e 4 são demonstrados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Análise de Sensibilidade dos pesos

Modo de Falha I		Modo de Falha II	
Cenário	Melhor alternativa	Cenário	Melhor alternativa
0	1400	0	3100
1	1300	1	2800
2	1400	2	2900
3	1300	3	2800
4	1000	4	2800
Modo de Falha III		Modo de Falha IV	
Cenário	Melhor alternativa	Cenário	Melhor alternativa
0	1800	0	3500
1	1400	1	3500
2	1500	2	3500
3	1400	3	3100
4	1000	4	3500

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Os resultados obtidos mostram que em todos cenários testados os resultados das melhores alternativas foram alteradas em pelo menos dois dos modos de falha, mostrando a importância de o decisor entender corretamente o impacto dos pesos na política adotada.

No primeiro cenário os pesos de todos os critérios foram considerados iguais, com isso as melhores alternativas para os modos de falha I, II e III sofreram alteração. Evidenciando assim a importância de se estabelecer junto ao decisor pesos que representem a preferência do decisor em cada critério.

No cenário 2 foi testado a sensibilidade do modelo aos pesos atribuídos. Isto foi feito através da diminuição da diferença entre os pesos da alternativa mais preferível para as menos

preferíveis. Neste caso, o modelo demonstrou-se sensível a variação nos pesos atribuídos a cada critério já que os modos de falha I, II e III sofreram alterações nas melhores alternativas.

Já os cenários 3 e 4 evidenciaram a sensibilidade do modelo a preferência do decisor, já que ao modificar a ordem de preferência dos critérios os melhores intervalos de tempo também foram modificados.

Os resultados obtidos na análise de sensibilidade foram mostrados ao decisor e foi verificado que o cenário inicial correspondeu melhor a sua expectativa. Um fato evidenciado pelo mesmo para escolha do cenário inicial foi a caracterização dos critérios para o problema estudado. A caracterização foi fundamental para entender a importância de se incluir cada critério na modelagem. Pois neste cenário, critérios como saúde e segurança, reputação não eram tão evidenciados nas decisões de manutenção.

A avaliação dos MF do sistema permitiu identificar os intervalos de inspeção para cada modo de falha e seus impactos nas decisões de inspeção. Uma vez que um dos problemas encontrados nas inspeções deste tipo de sistema, era que ao realizar a inspeção em um único período para todo o sistema, parte dos subsistemas encontravam-se no estado normal no momento da inspeção enquanto outros falhavam antes ou pouco depois do período de inspeção. Foi demonstrado que cada MF tem um tempo de inspeção indicado. Isso se dá pois os defeitos/falhas seguem distribuições diferentes, além de ter diferentes impactos. Ao minimizar os impactos para cada modo de falha, consegue-se uma melhoria global para o sistema.

Portanto, a análise de acordo com o Framework proposto pode trazer benefícios do ponto de vista gerencial à medida que, propõe um intervalo de inspeção para cada MF, auxiliando o planejamento das atividades de inspeção e proporcionando a minimização dos custos e do *downtime*, com menores impactos a saúde e segurança, reputação, qualidade e ao meio ambiente para todo o sistema. Os critérios estudados não eram considerados nas decisões de inspeção neste ambiente e são de fundamental importância para o decisor.

5.3 Considerações finais do capítulo 5

Neste capítulo uma aplicação foi realizada em uma usina termelétrica com a finalidade de validar do modelo proposto. Verificou-se o quão importante passa a ser esta metodologia para a determinação do intervalo entre as inspeções em um sistema com modos

de falhas com consequências e características distintas. Os resultados obtidos mantiveram consistentes com relação aos pesos selecionados quando se os avalia em relação a outros cenários prováveis.

Esta metodologia mostrou-se relevante para a literatura, pois além da fácil aplicação e adaptabilidade a qualquer ambiente industrial, não foi encontrado na literatura uma metodologia similar para o desenvolvimento de modelos em manutenção, que levasse em consideração o *delay-time*, a análise de modos de falha e os MCDA. No próximo capítulo serão apresentados as conclusões.

6. CONCLUSÕES

Esta dissertação explorou a classificação dos sistemas de acordo com os seus modos de falha, integrada ao conceito FMEA, o qual demonstrou que cada modo de falha possui características distintas e por isso pode impactar em diferentes critérios.

Outro ponto observado na literatura, é que geralmente apenas um critério de decisão é analisado (custo ou *downtime*). Neste sentido, a presente dissertação atingiu o objetivo de construir um modelo de inspeção para sistemas complexos que levasse em consideração as preferências do decisor e os modos de falha. Para tal, seis critérios de decisão foram propostos (custo, *downtime*, reputação, impacto ambiental, saúde e segurança e qualidade) e modelados utilizando o conceito *delay-time* em conjunto com a classificação dos modos de falha proposta pelo FMEA em um contexto específico. Como resultado, uma decisão estratégica poderá ser feita de uma forma mais estruturada.

Na prática, esta dissertação propõe uma abordagem diferente da encontrada na literatura para definir uma política de inspeção em sistemas complexos, pois quando são agrupados diversos componentes para definir uma política de inspeção implicitamente agrupam-se os modos de falha. O modelo proposto definiu a política de inspeção para cada modo de falha. Neste sentido, o framework desenvolvido contribuiu para melhorar as atividades de manutenção na organização, tais como:

- Análise dos modos de falha: As primeiras etapas do modelo sugerem passos para identificação dos modos de falha, resultando assim em uma visão estratificada dos sistemas. A consideração desta visão na modelagem de inspeção proporciona uma análise que pode incorrer em uma minimização dos impactos globais.

- Definição dos critérios de decisão: Outra contribuição do modelo é o diagrama de decisão proposto, o qual tem como resultado respostas de carácter binário, cuja finalidade é auxiliar o decisor no processo de definição dos critérios de decisão a serem utilizados para cada MF.

- Definição do intervalo de inspeção: Ao levar em consideração os modos de falha do sistema e seus respectivos critérios, tem-se como resultado do modelo a definição de intervalos de inspeção que minimizam os impactos de cada modo de falha, resultando assim em menores impactos para o sistema como um todo.

A partir da aplicação do framework proposto, os intervalos de inspeção para cada modo de falha foram propostos e discutidos, verificando assim a aplicabilidade do mesmo. Apesar de o caso estudado ser específico, o modelo proposto pode ser aplicado em diferentes sistemas complexos que envolvam um problema de decisão semelhante.

7. REFERÊNCIAS

- Akbarov, A., Christer, A. H., & Wang, W. (2008). Problem identification in maintenance modelling: a case study. *International Journal of Production Research*, 46(4), 1031–1046. <https://doi.org/10.1080/00207540600960708>
- Almeida-Filho, A., Ferreira, R. J. P. ., & de Almeida, A. (2013). A DSS Based on Multiple Criteria Decision Making for Maintenance Planning in an Electrical Power Distributor. In J. Purshouse, RC; Fleming, PJ; Fonesca, CM; Greco, S; Shaw (Ed.), *Evolutionary multi-criterion optimization, EMO 2013* (pp. 787–795). Springer.
- Amaral, T. M., & Costa, A. P. C. (2014). Improving decision-making and management of hospital resources: An application of the PROMETHEE II method in an Emergency Department. *Operations Research for Health Care*, 3(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2013.10.002>
- Andrawus, J., Watson, J., Kishk, M., & Gordon, H. (2008). Optimisation of Wind Turbine Inspection Intervals. *Wind Engineering*, 32(5), 477–490. <https://doi.org/10.1260/030952408786411921>
- Antão, P., Calderón, M., Puig, M., Michail, A., Wooldridge, C., & Darbra, R. M. (2016). Identification of Occupational Health, Safety, Security (OHSS) and Environmental Performance Indicators in port areas. *Safety Science*, 85, 266–275. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.031>
- Arnold, R. D., & Wade, J. P. (2015). A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach. *Procedia Computer Science*, 44, 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.050>
- Attia, A. F. (1997). Estimation of the reliability function using the delay-time models. *Microelectronics Reliability*, 37(2), 323–327. [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(96\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(96)00012-1)
- Aven, T. (1984). Optimal inspection when the system is repaired upon detection of failure. *Microelectronics Reliability*, 24(5), 961–963. [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(84\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0026-2714(84)90027-1)
- Aven, T. (2009). Optimal test interval for a monotone safety system. *Journal of Applied Probability*, 46. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/25662427?seq=1#page_scan_tab_contents
- Aven, T., & Castro, I. T. (2009). A delay-time model with safety constraint. *Reliability Engineering and System Safety*, 94(2), 261–267. <https://doi.org/10.1016/j.res.2008.03.004>
- Baker, R. D., & Christer, A. H. (1994). Review of delay-time OR modelling of engineering aspects of maintenance. *European Journal of Operational Research*, 73(3), 407–422. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90234-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90234-8)
- Barlow, R. E., & Proschan, F. (1965). *Mathematical Theory of Reliability*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9781611971194>

Barlow, R. E., & Proschan, F. (1975). *Statistical Theory of Reliability and Life Testing: Probability Models*. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA006399>

Barron, H. F. (1992). Selecting a best multiattribute alternative with partial information about attribute weights. *Acta Psychologica*, 80(1), 91–103. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(92\)90042-C](https://doi.org/10.1016/0001-6918(92)90042-C)

Berg, M., & Epstein, B. (1978). Comparison of Age, Block, and Failure Replacement Policies. *IEEE Transactions on Reliability*, R-27(1), 25–29. <https://doi.org/10.1109/TR.1978.5220230>

Bertolini, M., Bevilacqua, M., Ciarapica, F. E., & Giacchetta, G. (2009). Development of Risk-Based Inspection and Maintenance procedures for an oil refinery. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(2), 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.01.003>

Biermann, W., Cromarty, R. ., & Dawson, N. . (2012). Economic modelling of a ferrochrome furnace. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(4), 301–308.

Bisanovic, S., Hajro, M., & Dlakic, M. (2011). A Profit-Based Maintenance Scheduling of Thermal Power Units in Electricity Market. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering* , 5(3).

Bowles, J. B., & Peláez, C. E. (1995). Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 50(2), 203–213. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00068-D](https://doi.org/10.1016/0951-8320(95)00068-D)

Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management Science*, 31(6), 647–656. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2631441>

Brecka, J. (1994). The american customer satisfaction index. *Quality Progress*, 27(10).

CAI, J., ZUO, H., & WANG, H. (2007). Optimal Inspection Model Using Delay-Time Concept-- 《Journal of Applied Sciences》 2007年04期. *Journal of Applied Sciences*, 4. Retrieved from http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotol-YYKX200704015.htm

Canto, S. P. (2008). Application of Benders' decomposition to power plant preventive maintenance scheduling. *European Journal of Operational Research*, 184(2), 759–777. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.11.018>

Cavalcante, C. A. V., Alencar, M. H., & Lopes, R. S. (2016). Multicriteria Model to Support Maintenance Planning in Residential Complexes under Warranty. *Journal of Construction Engineering and Management*, 4016110. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001250](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001250)

Cavalcante, C. A. V., Scarf, P. A., & de Almeida, A. T. (2011). A study of a two-phase inspection policy for a preparedness system with a defective state and heterogeneous lifetime. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(6), 627–635.

<https://doi.org/10.1016/j.res.2010.12.004>

Cavalcante, C. A. V., & Lopes, R. S. (2015). Multi-criteria model to support the definition of opportunistic maintenance policy: A study in a cogeneration system. *Energy*, *80*, 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.039>

Cavalcante, C. A. V., Scarf, P. A., & De Almeida, A. T. (2011). A study of a two-phase inspection policy for a preparedness system with a defective state and heterogeneous lifetime. *Reliability Engineering and System Safety*, *96*(6), 627–635. <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.12.004>

Chanamool, N., & Naenna, T. (2016). Fuzzy FMEA application to improve decision-making process in an emergency department. *Applied Soft Computing*, *43*, 441–453. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.01.007>

Cho, D. I., & Parlar, M. (1991). A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research*, *51*(1), 1–23. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(91\)90141-H](https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90141-H)

Christer, A. (1999). Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance. *Journal of the Operational Research Society*, *50*, 1120–1137. Retrieved from <http://www.stockton-press.co.uk/jors>

Christer, A. H. (1976). Innovative Decision Making. In *NATO Conference on the Role and Effectiveness of Theories of Decision in Practice* (pp. 368–377). UK.

Christer, A. H., & Redmond, D. F. (1992). Revising models of maintenance and inspection. *International Journal of Production Economics*, *24*(3), 227–234. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(92\)90134-S](https://doi.org/10.1016/0925-5273(92)90134-S)

Christer, A. H., & Waller, W. M. (1984). Delay Time Models of Industrial Inspection Maintenance Problems. *The Journal of the Operational Research Society*, *35*(5), 401. <https://doi.org/10.2307/2581368>

Christer, A. H., Wang, W., Choi, K., & Schouten, F. A. V. D. D. (2001). The robustness of the semi-Markov and delay time single-component inspection models to the Markov assumption. *IMA Journal of Management Mathematics*, *12*(1), 75–88. <https://doi.org/10.1093/imaman/12.1.75>

Costa, H. G., Mansur, A. F. U., Freitas, A. L. P., & Carvalho, R. A. de. (2007). ELECTRE TRI aplicado a avaliação da satisfação de consumidores. *Produção*, *17*(2), 230–245. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132007000200002>

Cunningham, A., Wang, W., Zio, E., Allanson, D., Wall, A., & Wang, J. (2011). Application of Delay-Time Analysis via Monte Carlo Simulation. *Journal of Marine Engineering and Tech-Nology*, *10*(3), 57–72.

Dağsuyu, C., Göçmen, E., Narlı, M., & Kokangül, A. (2016). Classical and fuzzy FMEA risk analysis in a sterilization unit. *Computers & Industrial Engineering*, *101*, 286–294. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.09.015>

Dahal, K. P., & Chakpitak, N. (2007). Generator maintenance scheduling in power systems using metaheuristic-based hybrid approaches. *Electric Power Systems Research*, 77(7), 771–779. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.06.012>

de Almeida, A. T. (2013). *Processo de decisão nas organizações: Construindo modelos de decisão multicritério*. São Paulo: Atlas.

de Almeida, A. T., Cavalcante, C. A. V., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., de Almeida-Filho, A. T., & Garcez, T. V. (2015). *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis* (Vol. 231). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17969-8>

de Almeida, A. T., Ferreira, R. J. P., & Cavalcante, C. A. V. (2015). A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability. *IMA Journal of Management Mathematics*, 26(3), 249–271. <https://doi.org/10.1093/imaman/dpv010>

Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 51(3), 229–240. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0951-8320(95)00076-3)

Dekker, R., & Scarf, P. a. (1998). On the impact of optimisation models in maintenance decision making: the state of the art. *Reliability Engineering & System Safety*, 60(2), 111–119. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(98\)83004-4](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(98)83004-4)

Desa, M. I., & Christer, A. H. (2001). Modelling in the absence of data: a case study of fleet maintenance in a developing country. *Journal of the Operational Research Society*, 52(3), 247–260. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601107>

Deshpande, V. S., & Modak, J. P. (2002). Application of RCM to a medium scale industry. *Reliability Engineering and System Safety*, 77(1), 31–43. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00011-X)

Dieckmann, A., & Dippold, K. (2009). Compensatory versus noncompensatory models for predicting consumer preferences. *Judgment and Decision Making*, 4(3), 200–213.

Emovon, I., Norman, R. A., & Murphy, A. J. (2016). An integration of multi-criteria decision making techniques with a delay time model for determination of inspection intervals for marine machinery systems. *Applied Ocean Research*, 59, 65–82. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.05.008>

Eng-Larsson, F., & Norrman, A. (2014). Modal shift for greener logistics – exploring the role of the contract. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 44(10), 721–743. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-07-2013-0182>

Fang, L., & Zhaodong, H. (2015). System Dynamics Based Simulation Approach on Corrective Maintenance Cost of Aviation Equipments. *Procedia Engineering*, 99, 150–155. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.519>

Feili, H. R., Akar, N., Lotfizadeh, H., Bairampour, M., & Nasiri, S. (2013). Risk analysis of geothermal power plants using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique.

Energy Conversion and Management, 72, 69–76.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.027>

Ferreira, R., de Almeida, A. T., & Cavalcante, C. (2013). Selection of Inspection Intervals Based on Multi-attribute Utility Theory. In J. Purshouse, RC; Fleming, PJ; Fonesca, CM; Greco, S; Shaw (Ed.), *7th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO)* (pp. 490–499). Sheffield: Lecture Notes in Computer Science. Retrieved from http://apps-webofknowledge.ez16.periodicos.capes.gov.br/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=3&SID=4AznL6KpqK3YaJOrRic&page=6&doc=54&cacheurlFromRightClick=no

Ferreira, R. J. P., de Almeida, A. T., & Cavalcante, C. A. V. (2009). A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(5), 905–912.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.10.001>

Flage, R. (2014). A delay time model with imperfect and failure-inducing inspections. *Reliability Engineering & System Safety*, 124, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.11.009>

Fonseca-Junior, M., Holanda-Bezerra, U., Cabral-Leite, J., & Reyes-Carvajal, T. L. (2015). Maintenance management program through the implementation of predictive tools and TPM as a contribution to improving energy efficiency in power plants. *DYNA*, 82(194), 139–149.
<https://doi.org/10.15446/DYNA.V82N194.47642>

Fourcade, F., Johnson, E., Bara, M., & Cortey-Dumont, P. (1997). Optimizing nuclear power plant refueling with mixed-integer programming. *European Journal of Operational Research*, 97(2), 269–280. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00197-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00197-X)

Fragouli, E., & Ekruka, J. (2016). Reputation risk management in the international oil companies - Research Database, The University of Dundee. *International Journal of Information, Business and Management*, 8(2), 14.

French, S., Maule, J., & Papamichail, N. (2009). *Decision Behaviour, Analysis and Support*. Cambridge University Press. Retrieved from <https://books.google.com.br/books?id=KeMAgAAQBAJ>

Froger, A., Gendreau, M., Mendoza, J. E., Pinson, É., & Rousseau, L.-M. (2015). Maintenance scheduling in the electricity industry: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 251(3), 695–706. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.045>

Gomes, Luiz Flavio Autran Monteiro; Gomes, Carlos Francisco Simões; de Almeida, A. T. (2009). *Tomada de Decisão Gerencial - Enfoque Multicritério* (3 ed.). São Paulo: Atlas.

Guitouni, A., & Martel, J.-M. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, 109(2), 501–521.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00073-3)

Gupta, S., Tewari, P. C., Gupta, S., & Tewari, P. C. (2009). Simulation modeling and analysis

of a complex system of a thermal power plant, 2(22), 387–406. <https://doi.org/10.3926/jiem.2009.v2n2.p387-406>

Gupta, S., Tewari, P. C., & Sharma, A. K. (2008). A performance modeling and decision support system for a feed water unit of a thermal power plant. *South African Journal of Industrial Engineering Nov*, 19(2), 125–134.

Gupta, S., Tewari, P. C., & Sharma, A. K. (2009). Reliability and availability analysis of the ash handling unit of a steam thermal power plant. *South African Journal of Industrial Engineering May*, 20(1), 147–158.

Hastings, N. A. J., & Jardine, A. K. S. (1979). Component replacement and the use of Relcode. *Microelectronics Reliability*, 19(1–2), 49–56. [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(79\)90361-5](https://doi.org/10.1016/0026-2714(79)90361-5)

Hu, H., Cheng, G., Duan, Q., Wu, W., & Xu, C. (2009). Delay time model based on imperfect maintenance. *Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University*, 43(6), 103–107.

Isigonis, P., Ciffroy, P., Zabeo, A., Semenzin, E., Critto, A., Giove, S., & Marcomini, A. (2015). A Multi-Criteria Decision Analysis based methodology for quantitatively scoring the reliability and relevance of ecotoxicological data. *The Science of the Total Environment*, 538, 102–116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.016>

J.P. Brans. (1982). L'ingénierie de la décision; Elaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHE. In Nadeau and M. Landry (Ed.), *L'aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir* (pp. 201–208). Québec, Canada: Presses de l'Université Laval. Retrieved from <http://www.lamsade.dauphine.fr/mcda/biblio/Year/1982.complete.html#Bra1982>

Jato-Espino, D., Castillo-Lopez, E., Rodriguez-Hernandez, J., & Canteras-Jordana, J. C. (2014). A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. *Automation in Construction*, 45, 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.013>

Jia, X., & Christer, A. H. (2002). A periodic testing model for a preparedness system with a defective state. *IMA Journal of Management Mathematics*, 13(1), 39–49. <https://doi.org/10.1093/imaman/13.1.39>

Jia, X., Wang, D., Jiang, P., & Guo, B. (2016). Inference on the reliability of Weibull distribution with multiply Type-I censored data. *Reliability Engineering & System Safety*, 150, 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.01.025>

Jones, B., Jenkinson, I., & Wang, J. (2009). Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry. *Reliability Engineering and System Safety*, 94(1), 111–124. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.12.005>

Kabir, G., & Sumi, R. S. (2014). Power substation location selection using fuzzy analytic hierarchy process and PROMETHEE: A case study from Bangladesh. *Energy*, 72, 717–730. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.098>

- Kaio, N., & Osaki, S. (1986). Optimal inspection policies: A review and comparison. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 119(1), 3–20. [https://doi.org/10.1016/0022-247X\(86\)90141-1](https://doi.org/10.1016/0022-247X(86)90141-1)
- Kamissoko, D., Pérès, F., Zaraté, P., & Gourc, D. (2015). Complex system representation for vulnerability analysis. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 48(3), 948–953. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.205>
- Khan, F. I., & Amyotte, P. R. (2005). I2SI: A comprehensive quantitative tool for inherent safety and cost evaluation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18(4), 310–326. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.06.022>
- Kolfschoten, G., French, S., & Brazier, F. (2014). A discussion of the cognitive load in collaborative problem-solving. *EURO Journal on Decision Processes*, 2(3–4), 257–280. <https://doi.org/10.1007/s40070-014-0034-9>
- Kralj, B. L., & Petrović, R. (1988). Optimal preventive maintenance scheduling of thermal generating units in power systems —A survey of problem formulations and solution methods. *European Journal of Operational Research*, 35(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(88\)90374-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90374-8)
- Kumar, D., & Pandey, P. C. (1993). Maintenance planning and resource allocation in a urea fertilizer plant. *Quality and Reliability Engineering International*, 9(5), 411–423. <https://doi.org/10.1002/qre.4680090505>
- Lin, Z.-L., Huang, Y.-S., & Fang, C.-C. (2015). Non-periodic preventive maintenance with reliability thresholds for complex repairable systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 136, 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.12.010>
- Liu, H.-C., You, J.-X., Li, P., & Su, Q. (2016). Failure Mode and Effect Analysis Under Uncertainty: An Integrated Multiple Criteria Decision Making Approach. *IEEE Transactions on Reliability*, 65(3), 1380–1392. <https://doi.org/10.1109/TR.2016.2570567>
- LIU, H., XU, J., ZHANG, J., SUN, H., ZHANG, J., & WU, Y. (2012). Oil/water separation in a liquid-liquid cylindrical cyclone. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 24(1), 116–123. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(11\)60225-4](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(11)60225-4)
- Liu, X., Wang, W., Peng, R., & Zhao, F. (2015). A delay-time-based inspection model for parallel systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 229(6), 556–567. <https://doi.org/10.1177/1748006X15591618>
- Lopes, R. S., Cavalcante, C. A. V., & Alencar, M. H. (2015). Delay-time inspection model with dimensioning maintenance teams: A study of a company leasing construction equipment. *Computers & Industrial Engineering*, 88, 341–349. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.07.009>
- Lu, W. Y., & Wang, W. (2011). Modelling Preventive maintenance based on the delay time concept in the context of a case study. *Eksploracja I Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 3(3), 4–10.
- Lu, X., Wang, W., Yang, H., Zuo, M. J., & Zhou, D. (2012). Optimizing the Periodic

Inspection Interval for a 1-out-of-2 Cold Standby System Using the Delay-Time Concept. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(6), 648–662. <https://doi.org/10.1002/qre.1395>

Martinez Leon, H. C., Farris, J. A., & Letens, G. (2013). Improving Product Development Performance Through Iteration Front-Loading. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 60(3), 552–565. <https://doi.org/10.1109/TEM.2012.2228205>

Meltem Öztürk, A. T., & Vincke, P. (2005). Preference modelling. In M. Figueira, José; Greco, Salvatorri; Erhgott (Ed.), *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys* (Springer). Boston: Springer.

Mengesha, Yonatan; Singh, Ajit Pal; Amedie, W. Y. (2013). Quality improvement using statistical process control tools in glass bottles manufacturing company. *International Journal for Quality Research*, 7(1), 107–126.

Mirabedini, S. N., & Iranmanesh, H. (2013). A scheduling model for serial jobs on parallel machines with different preventive maintenance (PM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(9–12), 1579–1589. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5348-4>

Mitroff, I. I., Betz, F., Pondy, L. R., & Sagasti, F. (1974). On Managing Science in the Systems Age: Two Schemas for the Study of Science as a Whole Systems Phenomenon. *Interfaces*, 4(3), 46–58. <https://doi.org/10.1287/inte.4.3.46>

Moghaddam, K. S. (2015). Preventive maintenance and replacement optimization on CNC machine using multiobjective evolutionary algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9–12), 2131–2146. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6391-5>

Monds, J. R. (2013). Multicriteria Decision Analysis for Wave Power Technology in Canada. *Journal of Energy Resources Technology*, 136(2), 21201. <https://doi.org/10.1115/1.4025408>

Monghasemi, S., Nikoo, M. R., Khaksar Fasaee, M. A., & Adamowski, J. (2015). A novel multi criteria decision making model for optimizing time–cost–quality trade-off problems in construction projects. *Expert Systems with Applications*, 42(6), 3089–3104. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.032>

Monte, M. B. da S., & Filho, A. T. de A. (2015). A MCDM Model for Preventive Maintenance on Wells for Water Distribution. In *2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (pp. 268–272). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SMC.2015.59>

Morais, D. C., & de Almeida, A. T. (2007). Group decision-making for leakage management strategy of water network. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 441–459. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.06.008>

Morais, D. C., de Almeida, A. T., Alencar, L. H., Clemente, T. R. N., Cavalcanti, C. Z. B., Morais, D. C., ... Cavalcanti, C. Z. B. (2015). PROMETHEE-ROC Model for Assessing the Readiness of Technology for Generating Energy. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2015/530615>

- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2 ed.). Oxford,: Industrial Press.
- Müller-Leonhardt, A., Mitchell, S. G., Vogt, J., & Schürmann, T. (2014). Critical Incident Stress Management (CISM) in complex systems: Cultural adaptation and safety impacts in healthcare. *Accident Analysis and Prevention*, 68, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.12.018>
- Nakagawa, T., & Osaki, S. (1976). A summary of optimum preventive maintenance policies for a two-unit standby redundant system. *Zeitschrift Für Operations Research*, 20(5), 171–187. <https://doi.org/10.1007/BF01920262>
- Nazemi, E., & Shahanaghi, K. (2015). Developing an Inspection Optimization Model Based on the Delay-Time Concept. *Journal of Industrial Engineering*, 2015, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2015/843137>
- Nguyen, K.-A., Do, P., & Grall, A. (2015). Multi-level predictive maintenance for multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 144, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.07.017>
- Nicolai, R. P., & Dekker, R. (2007). A review of multi-component maintenance models, (1996), 289–296.
- Nicolai, R. P., & Dekker, R. (2008). Optimal Maintenance of Multi-component Systems : A Review. *Complex System Maintenance Handbook*, (1991), 263–286. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7_11
- Ochrana, F., Půček, M., & Plaček, M. (2015). The Use of FMEA for the Analysis of Corruption: A Case Study from Bulgaria. *Procedia Economics and Finance*, 30, 613–621. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01274-5](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01274-5)
- OKUMURA, S., JARDINE, A. K. S., & YAMASHINA, H. (1996). An inspection policy for a deteriorating single-unit system characterized by a delay-time model. *International Journal of Production Research*, 34(9), 2441–2460. <https://doi.org/10.1080/00207549608905037>
- Oliveira, J. B., Lima, R. S., & Montevechi, J. A. B. (2016). Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 62, 166–191. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.02.001>
- Peláez, E. C., & Bowles, J. B. (1996). Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure modes and effects analysis. *Information Sciences*, 88(1), 177–199. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(95\)00161-1](https://doi.org/10.1016/0020-0255(95)00161-1)
- Pillay, A. (2003). Chapter 8 Maintenance modelling. *Elsevier Ocean Engineering Series*, 7(C), 179–211. [https://doi.org/10.1016/S1571-9952\(03\)80010-7](https://doi.org/10.1016/S1571-9952(03)80010-7)
- Pillay, A., Wang, D., & Wall, A. (2001). Optimal Inspection Period for Fishing Vessel Equipment: A Cost and Downtime Model Using Delay Time Analysis. *Marine Technology*, 38(2), 122–129.
- Pillay, A., & Wang, J. (2003). Modified failure mode and effects analysis using approximate

- reasoning. *Reliability Engineering & System Safety*, 79(1), 69–85. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00179-5](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00179-5)
- Pintelon, L., & Parodi-herz, A. (2008). Evolution of Concepts and Approaches Maintenance : An Evolutionary Perspective.
- Ramadan, S. (2016). A bi-objective inspection policy optimization model for finite-life repairable systems using a genetic algorithm. *Advances in Production Engineering & Management*, 11(1), 38–48. <https://doi.org/10.14743/apem2016.1.208>
- Ramzan, N., Naveed, S., Feroze, N., & Witt, W. (2009). Multicriteria decision analysis for safety and economic achievement using PROMETHEE: A case study. *Process Safety Progress*, 28(1), 68–83. <https://doi.org/10.1002/prs.10263>
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega (United Kingdom)*, 53, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- Riabacke, M., Danielson, M., & Ekenberg, L. (2012). State-of-the-Art Prescriptive Criteria Weight Elicitation. *Advances in Decision Sciences*, 1–24. <https://doi.org/10.1155/2012/276584>
- SHI, X., QIU, X., ZHOU, J., CHEN, X., FAN, Y., & LU, E. (2016). Application of Hilbert-Huang transform based delay time identification in optimization of short millisecond blasting. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(7), 1965–1974. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64310-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64310-8)
- Silva, M. M., de Gusmão, A. P. H., Poleto, T., Silva, L. C. e, & Costa, A. P. C. S. (2014). A multidimensional approach to information security risk management using FMEA and fuzzy theory. *International Journal of Information Management*, 34(6), 733–740. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.07.005>
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis : FMEA from theory to execution*. ASQ Quality Press.
- Sullivan, G. P., Pugh, R., P. Melendex, A., & D. Hunt, W. (2010). Types of Maintenance Programs. *Operations & Maintenance Best Practices*, 1–9. Retrieved from http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/omguide_complete.pdf
- Trentin, A. (2011). Third-party logistics providers offering form postponement services: value propositions and organisational approaches. *International Journal of Production Research*, 49(6), 1685–1712. <https://doi.org/10.1080/00207541003623414>
- Van Horenbeek, A., Kellens, K., Pintelon, L., & Duflou, J. R. (2014). Economic and Environmental Aware Maintenance Optimization. *Procedia CIRP*, 15, 343–348. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.048>
- Van Horenbeek, A., & Pintelon, L. (2013). A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 120, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.02.029>

- van Oosterom, C. D., Elwany, A. H., Çelebi, D., & van Houtum, G. J. (2014). Optimal policies for a delay time model with postponed replacement. *European Journal of Operational Research*, 232(1), 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.038>
- Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139(3), 469–489. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00197-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00197-7)
- Wang, H., Wang, W., & Peng, R. (2017). A two-phase inspection model for a single component system with three-stage degradation. *Reliability Engineering & System Safety*, 158, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.005>
- Wang, L., Hu, H., Wang, Y., Wu, W., & He, P. (2011). The availability model and parameters estimation method for the delay time model with imperfect maintenance at inspection. *Applied Mathematical Modelling*, 35(6), 2855–2863. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.070>
- Wang, W. (2008). Delay Time Modelling. In *Complex System Maintenance Handbook* (pp. 345–370). London: Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7_14
- Wang, W. (2009). An inspection model for a process with two types of inspections and repairs. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2), 526–533. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.06.010>
- Wang, W. (2011). A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the Delay-Time concept. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(11), 1535–1541. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.07.004>
- Wang, W. (2012). An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling. *Reliability Engineering & System Safety*, 106, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.04.004>
- Wang, W. (2013). Models of inspection, routine service, and replacement for a serviceable one-component system. *Reliability Engineering & System Safety*, 116, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.03.006>
- Wang, W., Banjevic, D., & Pecht, M. (2010). A multi-component and multi-failure mode inspection model based on the delay time concept. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(8), 912–920. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.04.004>
- Wang, W., Carr, M. J., Chow, T. W. S., & Pecht, M. G. (2012). A Two-Level Inspection Model With Technological Insertions. *IEEE Transactions on Reliability*, 61(2), 479–490. <https://doi.org/10.1109/TR.2012.2183911>
- Wang, W., & Christer, A. H. (2003). Solution algorithms for a nonhomogeneous multi-component inspection model. *Computers & Operations Research*, 30(1), 19–34. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(01\)00074-0](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00074-0)
- Wang, W., Zhao, F., & Peng, R. (2014). A preventive maintenance model with a two-level inspection policy based on a three-stage failure process. *Reliability Engineering & System*

Safety, 121, 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.08.007>

Wang, Y. Y., Deng, C., Wu, J., Wang, Y. Y., & Xiong, Y. (2014). A corrective maintenance scheme for engineering equipment. *Engineering Failure Analysis*, 36, 269–283. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.10.006>

Wessiani, N. A., & Sarwoko, S. O. (2015). Risk Analysis of Poultry Feed Production Using Fuzzy FMEA. *Procedia Manufacturing*, 4, 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.041>

Xiao, N., Huang, H.-Z., Li, Y., He, L., & Jin, T. (2011). Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. *Engineering Failure Analysis*, 18(4), 1162–1170. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.02.004>

Yang, L., Ma, X., Zhai, Q., & Zhao, Y. (2016). A delay time model for a mission-based system subject to periodic and random inspection and postponed replacement. *Reliability Engineering & System Safety*, 150, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.01.016>

YANG, R., ZHAO, F., KANG, J., LI, H., & TENG, H. (2015). Inspection optimization model with imperfect maintenance based on a three-stage failure process. *Eksploatacja I Niezawodnosc - Maintenance and Reliability*, 17(2), 165–173. <https://doi.org/10.17531/ein.2015.2.1>

Zeng, Q., Wang, Z., Wang, X., Zhao, Y., & Guo, X. (2016). A novel oil–water separator design and its performance prediction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.03.015>

Zequeira, R. I., & Bérenguer, C. (2005). On the inspection policy of a two-component parallel system with failure interaction. *Reliability Engineering & System Safety*, 88(1), 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.res.2004.07.009>

Zhang, Z., Wu, S., Li, B., & Lee, S. (2013). Expert Systems with Applications Optimal maintenance policy for multi-component systems under Markovian environment changes, 40, 7391–7399.

Zio, E., & Bazzo, R. (2010). Multiobjective optimization of the inspection intervals of a nuclear safety system: A clustering-based framework for reducing the Pareto Front. *Annals of Nuclear Energy*, 37(6), 798–812. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2010.02.020>