

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ROBISON OHTA

Análise multicritério com incerteza aplicada à gestão da manutenção industrial

Guaratinguetá
2020

Robison Ohta

Análise multicritério com incerteza aplicada à gestão da manutenção industrial

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na área de Otimização, Simulação e Tomada de Decisão.

Orientador: Prof. Dr. Valério A. P. Salomon

Coorientador: Prof. Dr. Messias B. Silva

Guaratinguetá

2020

O38a	Ohta, Robison Análise multicritério com incerteza aplicada à gestão da manutenção industrial / Robison Ohta – Guaratinguetá, 2020. 82 f : il. Bibliografia: f. 74-82 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020. Orientador: Prof. Dr. Valério Antonio Pamplona Salomon Coorientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva 1. Manutenção produtiva total. 2. Análise de envoltória de dados. 3. Processo decisório por critério múltiplo. I. Título CDU 658.581(043)
------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ROBISON OHTA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

PROGRAMA: ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO: Mestrado

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Otávio José de Oliveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. VALÉRIO ANTONIO PAMPLONA SALOMON
Orientador / UNESP/FEG
participou por videoconferência

Prof. Dr. PALOMA MARIA SILVA ROCHA RIZOL
UNESP/FEG
participou por videoconferência

Dr. DIMAS CAMPOS DE AGUIAR
MAXION
participou por videoconferência

Agosto de 2020

DADOS CURRICULARES

ROBISON OHTA

NASCIMENTO 15/04/1980 - São Paulo / SP

FILIAÇÃO Takechi Ohta
Carmem Lucia Ohta

2009 / 2014 Curso de Graduação - Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho

2018 / 2020 Curso de Pós Graduação - Engenharia de
Produção
Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho

*Dedico esse trabalho ao meu pai Takechi,
que infelizmente não pode estar presente neste
momento tão feliz da minha vida, pois se hoje
estou aqui, devo muitas coisas a ele e a seus
ensinamentos e valores passados. Muito
obrigado por tudo! Saudades eternas!*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa Louise pelo seu apoio incondicional em todas etapas deste trabalho e ao meu filho Heitor. Nas horas em que eu pensava em desistir, eram neles que eu encontrava forças para continuar.

A minha mãe Carmem e ao meu pai Takechi, que de muitas formas me incentivaram e ajudaram para que fosse possível a concretização deste trabalho. Ao irmão Anderson pelo apoio, incentivo e amizade em todas as horas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Valério A. P. Salomon que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível e ao meu co-orientador, Prof. Dr. Messias B. Silva pela orientação, auxílio e incentivo no início desse trabalho.

À Prof^a. Dr^a. Paloma M. S. Rocha Rizol e ao Dr. Dimas C. Aguiar pelas colaborações na qualificação e defesa da dissertação.

Às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá por toda dedicação e alegria no atendimento.

A Deus, por toda sua graça, sempre.

*“Toda decisão acertada é proveniente de
experiência. E toda experiência é proveniente
de uma decisão não acertada.”
(Albert Einstein)*

RESUMO

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo auxiliar gestores de manutenção em problemas de subjetividade inerentes na gestão da manutenção, aplicando métodos e técnicas de análise multicritério. A gestão da manutenção industrial possui processos de tomada de decisão típicos, com múltiplos critérios que conflitam entre si, com parâmetros tangíveis e intangíveis. Medir o peso de fatores críticos é uma questão crítica na engenharia e no gerenciamento de ativos, pois abrange vários aspectos ao mesmo tempo e que dependem de uma avaliação subjetiva de especialistas. Um bom processo de manutenção aumenta a confiabilidade dos processos, aumenta o lucro do fabricante e também aumenta a satisfação do cliente final. Para atingir esses objetivos, são utilizados os métodos de apoio a decisão com múltiplos critérios ou *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM), mais especificamente os métodos *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e o *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT). Como suas restrições e possíveis consequências não são conhecidas com exatidão, são utilizados suas variações fuzzificadas, o *Fuzzy AHP* (FAHP) e o método *Fuzzy MAUT* (FMAUT). Após uma revisão bibliográfica nos dois métodos, foi avaliado a gestão da incerteza nas avaliações e os resultados dos julgamentos foram apresentados por meio de uma matriz decisória onde compara-se os métodos AHP e FAHP em um problema de seleção de estratégias de manutenção e o resultado desta pesquisa demonstrou que, entre as estratégias previamente selecionadas, a Manutenção Corretiva (MC) foi o subcritério com a maior prioridade e o Valor Agregado (VA) o critério prioritário dentre as selecionadas pelos especialistas. Para o estudo dos métodos MAUT e FMAUT, foi aplicado em um problema gerencial de peças sobressalentes para a manutenção, onde encontrou-se que a classificação Desejáveis (DE) para peças de estoque foi o subcritério que alcançou a maior importância dentre as selecionadas pelo grupo decisor e a Criticidade do Equipamento (CE) o critério de maior importância conforme preestabelecido. A partir deste estudo, concluímos que o método AHP é preferível para um ambiente em que necessite estimar os pesos dos critérios de avaliação e modelo MAUT é preferível em situações que necessite a avaliação das alternativas e que a utilização da lógica *Fuzzy* nem sempre gera resultados diferentes.

PALAVRAS-CHAVE: AHP. *Fuzzy Sets*. Manutenção industrial. MAUT. MCDM.

ABSTRACT

This master's dissertation aims to assist maintenance managers in subjectivity problems inherent in maintenance management, applying multicriteria analysis methods and techniques. The industrial maintenance management has typical decision-making processes, with multiple criteria that conflict with each other, with tangible and intangible parameters. Measuring the weight of critical factors is a critical issue in engineering and asset management, as it covers several aspects at the same time and which depend on a subjective evaluation by experts. A good maintenance process increases the reliability of the processes, increases the manufacturer's profit and increases the satisfaction of the end customer too. To achieve these objectives, decision support methods with multiple criteria or Multi-Criteria Decision Making (MCDM) are used, more specifically the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) methods. As its restrictions and possible consequences are not known exactly, its fuzzified variations are used, the Fuzzy AHP (FAHP) and the Fuzzy MAUT (FMAUT) method are used. After a bibliographic review of the two methods, the management of the uncertainty in the evaluations was evaluated and the results of the judgments were presented through a decision matrix where the AHP and FAHP methods are compared in a maintenance strategy selection problem and the result of this research demonstrated that, among the previously selected strategies, Corrective Maintenance (CM) was the subcriterion with the highest priority and Value Added (VA) the priority criterion among those selected by specialists. For the study of MAUT and FMAUT methods, was applied to a management problem of spare parts for maintenance, where it was found that the Desirable classification (DE) for stock parts was the subcriterion that reached the most importance among those selected by the group decision and Equipment Criticality (EC) the most important criterion as pre-established. From this study, we conclude that the AHP method is preferable for an environment where it is necessary to estimate the weights of the evaluation criteria and the MAUT model is preferable in situations that require the evaluation of alternatives and that the use of Fuzzy logic does not always generate different results.

KEYWORDS: AHP. Fuzzy sets. Industrial maintenance. MAUT. MCDM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Número de publicações no período de 2009 a 2019 por palavra chave	19
Figura 2	Classificação da pesquisa.	21
Figura 3	Fluxograma de desenvolvimento da revisão bibliométrica.	23
Figura 4	Fluxograma da pesquisa.	24
Figura 5	Evolução das técnicas de manutenção.	27
Figura 6	O planejamento de manutenção como parte do corporativo sistema de planejamento.	33
Figura 7	Interrelação entre produção e manutenção.	34
Figura 8	Estratégias de manutenção selecionadas.	38
Figura 9	Critérios de avaliação.	38
Figura 10	Classificação da gestão de estoque.	39
Figura 11	Gestão de peças sobressalentes.	39
Figura 12	Representação da classificação do MCDM.	42
Figura 13	Diagrama da função de pertinência de um número <i>fuzzy</i> triangular.	45
Figura 14	Representação gráfica para o conjunto de termos da variável <i>fuzzy</i> linguística 'adequado' e 'preferência'.	46
Quadro 1	Escala fundamental de preferências.	47
Quadro 2	Índice randômico.	48
Figura 15	Funções de pertinências tradicionais do FAHP.	49
Figura 16	A intersecção entre M_1 e M_2	51
Figura 17	Passos do FMAUT para chegar ao objetivo final.	55
Figura 18	Função de associação <i>fuzzy</i>	65
Figura 19	Comparação entre AHP e FAHP.	69
Figura 20	Comparação entre MAUT e FMAUT.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados encontrados na pesquisa bibliométrica	19
Tabela 2 – Artigos mais citados por palavra chave.	20
Tabela 3 – Escala de conversão <i>fuzzy</i> triangular.	52
Tabela 4 – Julgamento dos critérios pelos especialistas.	58
Tabela 5 – Comparações dos critérios de estratégia para manutenção.	58
Tabela 6 – Prioridades locais e globais de estratégia para manutenção.	59
Tabela 7 – Comparações fuzzificadas dos critérios de estratégia para manutenção.	60
Tabela 8 – Matriz de Avaliação <i>Fuzzy</i> - Critério C1 x Alternativas.	60
Tabela 9 – Matriz de Avaliação <i>Fuzzy</i> - Critério C2 x Alternativas.	61
Tabela 10 – Matriz de Avaliação <i>Fuzzy</i> - Critério C3 x Alternativas.	61
Tabela 11 – Matriz de Avaliação <i>Fuzzy</i> - Critério C4 x Alternativas.	61
Tabela 12 – Matriz de Avaliação <i>Fuzzy</i> - Critério C5 x Alternativas.	62
Tabela 13 – Prioridades locais e globais de estratégia para manutenção fuzzificada.	62
Tabela 14 – Notas atribuídas pelos especialistas nos critérios.	63
Tabela 15 – Notas dos especialista para os subcritérios.	63
Tabela 16 – Peso dos critérios.	63
Tabela 17 – Peso dos subcritérios.	64
Tabela 18 – Prioridades locais e globais da gestão de peças para a manutenção.	64
Tabela 19 – Avaliação dos critérios pelos especialistas.	65
Tabela 20 – Termos lingüísticos usados na matriz de decisão.	65
Tabela 21 – Comparações fuzzificadas dos critérios para gestão de peças sobressalentes.	66
Tabela 22 – Notas fuzzificadas do critério X1 para os subcritérios.	66
Tabela 23 – Notas fuzzificadas do critério X2 para os subcritérios.	67
Tabela 24 – Notas fuzzificadas do critério X3 para os subcritérios.	67
Tabela 25 – Notas fuzzificadas do critério X4 para os subcritérios.	67
Tabela 26 – Notas fuzzificadas para o critério X5 para os subcritérios.	67
Tabela 27 – Notas fuzzificadas para o critério X6 para os subcritérios.	68
Tabela 28 – Prioridades locais e globais de estratégia para manutenção fuzzificada.	68
Tabela 29 – Comparação resultados dos métodos de estratégia para manutenção.	68
Tabela 30 – Prioridades locais e globais de estratégia para manutenção.	69
Tabela 31 – Prioridades locais de X1, X2, X3 e X4 para gestão de peças sobressalentes.	70
Tabela 31 – Prioridades locais de X5 e X6 para gestão de peças sobressalentes.	70
Tabela 32 – Prioridades globais para gestão de peças sobressalentes.	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos
AHP	<i>Analytic hierarchy process</i>
ANP	<i>Analytic network process</i>
CBM	<i>Condition based maintenance</i>
CE	Criticidade do equipamento
DE	Desejáveis
DSS	<i>Decision support systems</i>
ELECTREE	<i>Elimination and choice translating reality</i>
FAHP	<i>Fuzzy analytic hierarchy process</i>
FMAUT	<i>Fuzzy multi-attribute utility theory</i>
FPCM	<i>Fuzzy possibilistic C-means</i>
FPP	<i>Fuzzy preference programming</i>
FSN	<i>Fast moving, Slow moving e Non moving</i>
HFS	<i>Hesitant Fuzzy Sets</i>
IC	Índice de consistência
IFS	<i>Intuitionistic Fuzzy Sets</i>
IR	Índices randômicos
MADM	<i>Multi-attribute decision making</i>
MAUT	<i>Multi-attribute utility theory</i>
MAVT	<i>Multi-attribute value theory</i>
MC	Manutenção corretiva
MCC	Manutenção centrada na confiabilidade
MCDM	<i>Multi-criteria decision making</i>
MODM	<i>Multi-objective decision making</i>
MP	Manutenção preventiva

MTBF	<i>Mean time between failure</i>
MTTR	<i>Mean time to repair</i>
PCM	Planejamento e controle da manutenção
PROMETHEE	<i>Preference ranking organization and method for enrichment evaluation</i>
RBM	<i>Risk based maintenance</i>
RC	Razão de consistência
RCM	<i>Reliability centered maintenance</i>
TOPSIS	<i>Technique for order preference by similarity to ideal solution</i>
TPM	<i>Total productive maintenance</i>
VA	Valor agregado
VED	Vital, Essencial, Desejado

LISTA DE SÍMBOLOS

$\tilde{A}$	número <i>fuzzy</i>
$\mu_{\tilde{A}}$	função de pertinência de $\tilde{A}$
(l, m, n)	coordenadas dos três cantos da função triangular
$\oplus$	operador de adição <i>fuzzy</i>
$\ominus$	operador de subtração <i>fuzzy</i>
$\otimes$	operador de multiplicação <i>fuzzy</i>
$\oslash$	operador de divisão <i>fuzzy</i>
i	$i = 1, \dots, m$ (linhas da matriz)
j	$j = 1, \dots, n$ (colunas da matriz)
$\forall$	universal
λ_{max}	maior autovalor da matriz
A	matriz de comparações ou matriz de julgamento
w	vetor de prioridade
λ_n	autovalor da n-ésima matriz
M_j	medida de preferência em relação ao objetivo da decisão j
w_i	peso do atributo i
$U_i(x_i)$	valor de utilidade do atributo i no nível x_i
$U(X)$	valor geral de utilidade
TL_{ij}	menor valor da função utilidade da função pertinência para o nível j do atributo i
TU_{ij}	maior valor da função utilidade da função pertinência para o nível j do atributo i
w_{il}	peso dos especialistas no FMAUT

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	16
1.1.1	Bibliometria	18
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	20
1.3	MÉTODO DE PESQUISA	20
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	24
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1	MANUTENÇÃO	26
2.1.1	Histórico da Gestão da Manutenção	26
2.1.2	Tipos de Manutenção	28
2.1.2.1	Manutenção Corretiva	28
2.1.2.2	Manutenção Preventiva	29
2.1.2.3	Manutenção Preditiva	29
2.1.2.4	Manutenção Proativa	30
2.1.3	Gestão da Manutenção	30
2.1.3.1	Manutenção Produtiva Total (<i>Total Productive Maintenance</i> - TPM)	31
2.1.3.2	Manutenção Centrada na Confiabilidade (<i>Reliability Centered Maintenance</i> - RCM)	31
2.1.3.3	Manutenção Centrada no Risco (<i>Risk Based Maintenance</i> - RBM)	32
2.1.4	Planejamento e Controle da Manutenção (PCM)	33
2.2	GESTÃO DE PEÇAS SOBRESSALENTES (<i>SPARE PARTS</i>)	34
3	A MODELAGEM MULTICRITÉRIO	37
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA	37
3.2	MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO (MCDM)	41
3.3	LÓGICA <i>FUZZY</i>	43
3.3.1	Teoria dos conjuntos <i>Fuzzy</i>	44
3.3.2	Números <i>Fuzzy</i>	44
3.3.3	Variáveis linguísticas <i>Fuzzy</i>	45
3.4	<i>ANALYTIC HIERARCHY PROCESS</i>	46
3.5	<i>FUZZY AHP</i>	48
3.6	<i>MULTI-ATTRIBUTE UTILITY THEORY</i> (MAUT)	52
3.7	<i>FUZZY MAUT</i>	54
4	RESULTADOS	58
4.1	APLICAÇÃO DO AHP CLÁSSICO	58
4.2	APLICAÇÃO DO AHP <i>FUZZY</i>	60

4.3	APLICAÇÃO DO MAUT	62
4.4	APLICAÇÃO DO MAUT <i>FUZZY</i>	64
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
5.1	VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS E AS RESPOSTAS AS QUESTÕES	72
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Com a economia globalizada e altamente competitiva dos dias de hoje, as mudanças ocorrem em uma rapidez que impressiona, e a manutenção, como uma das atividades essenciais para o processo produtivo, não poderia ficar sem ocorrer mudanças. Com tais mudanças, as organizações vêm de forma incansável pela busca de novas ferramentas que auxiliam no gerenciamento, que as tornem mais competitivas através da qualidade e produtividade de seus produtos, processos e serviços (KARDEC; NASCIF, 2012).

Em várias indústrias de grande porte, o custo de manutenção pode chegar a 40% do orçamento efetivo (ETI; OGAI; PROBERT, 2006). Além disso, os custos relacionados a baixa qualidade e ao retrabalho representam aproximadamente 9% a 16% dos negócios (SÖRQVIST, 1998). Sabe-se também que a maioria das grandes empresas perde aproximadamente 2% a 16% do faturamento anual devido a paradas não planejadas de seus equipamentos (ETI; OGAI; PROBERT, 2006). Os custos de uma manutenção de má qualidade ou ineficiente são discutidos em SALONEN; DELERYD (2011).

No Brasil, a ABRAMAN – Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos – traz em seu Documento Nacional do ano de 2017, uma pesquisa representativa da indústria nacional. Esta pesquisa aponta, no geral, que o custo da manutenção sobre o faturamento representa 4%, o custo da manutenção sobre o valor imobilizado representa 6%, o custo relativo com o pessoal próprio representa 40% , o custo relativo com materiais representa 40% e o custo relativo a contratações representa 20%.

Uma manutenção adequada dos equipamentos da planta pode reduzir significativamente o custo operacional geral, além de aumentar a produtividade da planta. Os gestores podem considerar a manutenção da planta uma despesa, mas em uma abordagem mais positiva, pode-se ver o trabalho de manutenção como um centro de lucro. Em consideração a essa nova perspectiva, os requisitos para o gerenciamento de manutenção mudaram consideravelmente do antigo conceito de "consertar quando quebrado" para uma abordagem mais complexa, o que implica na adoção de uma estratégia de manutenção com abordagem e alinhamento mais integrados (BERTOLINI; BEVILACQUA, 2006).

Ainda, segundo Bertolini e Bevilacqua (2006), o desenvolvimento de novas tecnologias e práticas gerenciais significa que a equipe de manutenção deve ser dotada de crescentes habilidades técnicas e gerenciais.

Assim, estimar o melhor conjunto de políticas de manutenção para os diferentes modos de falha é uma tarefa difícil e complexa. Essa seleção requer o conhecimento de vários fatores, como aspectos de segurança, problemas ambientais, custos e restrições orçamentárias, utilização de mão-de-obra, MTBF (*Mean Time Between Failure*) e MTTR (*Mean Time To Repair*) para cada peça de equipamento, etc. O gerenciamento do grande número de atributos tangíveis e intangíveis que devem ser tomados em consideração representa a principal complexidade do problema. Apesar da grande importância do problema, não existem muitos estudos que tratem da análise e desenvolvimento da seleção de políticas de manutenção. Algumas abordagens do Sistema de Suporte à Decisão (*Decision Support System* - DSS) são propostas na literatura como um auxílio para a solução desse problema (BERTOLINI;

BEVILACQUA, 2006).

A seleção das estratégias de manutenção é um problema que envolve múltiplos critérios de tomada de decisão. Os gestores têm de selecionar a melhor política de manutenção para cada peça de equipamento ou sistema a partir de um conjunto de alternativas possíveis. Um bom programa de manutenção deve definir estratégias de manutenção adequadas para cada ativo industrial, visando otimizar os recursos da manutenção em busca da eficiência do ativo (BERTOLINI; BEVILACQUA, 2006; WANG; TRIANTAPHYLLOU, 2008). Assim, na década de 1990, surgiu uma nova abordagem para a tomada de decisão sobre manutenção. Com o argumento de que a teoria da decisão se tornou uma ferramenta útil para muitos profissionais, incluindo engenheiros, muitos desafios de manutenção podem ser modelados como problemas de tomada de decisão com múltiplos critérios (*Multi-criteria Decison Making* - MCDM), o uso de métodos MCDM foi sugerido para a tomada de decisão em manutenção (TRIANANTAPHYLLOU et al., 1997). A seleção da melhor estratégia de manutenção é um desses desafios aos quais o MCDM pode ser aplicável (GOOSSENS; BASTEN, 2015).

Para Arunraj e Maiti (2010), a análise e justificativa da seleção das estratégias de manutenção é uma tarefa árdua e complexa devido ao grande número de fatores a serem considerados, muitos dos quais são intangíveis. O método de escolha de políticas de manutenção normalmente depende de custo das políticas de manutenção juntamente com outros critérios, como qualidade do produto, disponibilidade de peças em estoque e o tempo de manutenção (BERTOLINI; BEVILACQUA, 2006). A análise MCDM não concentra-se, apenas na tomada de uma decisão. Seu objetivo é também fornecer informações sobre o processo de decisão (WRIGHT; GOODWIN, 2009). O MCDM contribui para analisar o contexto da tomada de decisão e organizar o processo, aumentando a coerência entre os objetivos e a decisão final, auxiliando a cooperação entre os tomadores de decisão, levando a uma melhor compreensão (ROY, 2005).

Wang (2012) diz que um estoque inadequado de peças sobressalentes pode levar a deterioração e a falha do sistema, enquanto manter peças sobressalentes em excesso pode implicar em custos excessivos. Em outras palavras, a indisponibilidade de peças de reposição afeta as operações de manutenção e prejudica a qualidade dos sistemas. Por outro lado, o excesso de oferta de peças de reposição requer mais espaço de armazenamento, o que não é econômico. Diante desse cenário, um gerenciamento eficiente das peças de reposição deve ter como objetivo otimizar os custos de fornecimento de peças de reposição em um ambiente que mantenha a operação normal da organização ou sistema (KRANENBURG; HOUTUM, 2008).

O desafio da gestão das peças sobressalentes é decidir a conveniência econômica de manter e controlar o estoque de um item em particular, pois existe o risco de aumento de estoque e, conseqüentemente, custos excessivos de armazenamento. Uma prática comum para o gerenciamento eficaz de estoque é agrupar as peças de reposição de acordo com algum método de classificação (HU et al., 2018). O apoio multicritério a decisão consiste em um conjunto de métodos para auxiliar pessoas e organizações a tomarem decisões, esclarecendo o problema e avaliando as alternativas através de múltiplos critérios, os quais são conflitantes na maioria dos casos (GOMES; AUTRAN; GOMES, 2014); (GOMES; YASIN; LISBOA, 2004). Para Ko e Kirsch (2017) a incerteza se relaciona à disponibilidade e credibilidade de dados para um fenômeno, enquanto para Cleden (2017) a incerteza pode decorrer da avaliação de uma

informação, entendimento, ritmo ou nível de complexidade do fenômeno.

Os conjuntos *Fuzzy* formulados por Zadeh (1965) envolvem a captura, representação e processamento de conceitos semânticos e objetos que não estão precisamente delimitados e vieram a atender a necessidade de diversas áreas do conhecimento humano no tocante ao que é incerto, vago e impreciso. A questão sobre a formulação de sentenças que possuem uma gama de valores além do binômio falso (0) ou verdadeiro (1), já havia sido levantada por Łukasiewicz (1929), propondo que pudessem assumir valores ≥ 0 e ≤ 1 . Modelos *Fuzzy* MCDM são usados para avaliar alternativas com relação a critérios predeterminados por um único tomador de decisão ou por um comitê de tomadores de decisão, onde a adequação de alternativas versus critérios e a importância dos critérios podem ser avaliadas usando valores linguísticos representados por números *fuzzy* (CHEN et al., 1992).

1.1.1 Bibliometria

A Bibliometria é uma área de pesquisa em ciências da informação e bibliotecas que analisa dados bibliográficos, como ano de publicação, autores, país de origem, entre outros, usando uma abordagem quantitativa (BROADUS, 1987). SENGUPTA (1992) refere-se à bibliometria como organização, classificação e avaliação quantitativa dos padrões de publicação por cálculo matemático e estatístico. Cobo et al. (2011) definiu uma abordagem bibliométrica que combina ferramentas de análise de desempenho e ferramentas de mapeamento de ciências para analisar um campo de pesquisa, além de detectar e visualizar seus subdomínios conceituais e sua evolução temática.

Portanto, a bibliometria é uma ferramenta para analisar a evolução das disciplinas com base na estrutura intelectual, social e conceitual (ZUPIC; ČATER, 2015). Ela analisa os resultados da pesquisa, incluindo os métodos empregados e as amostras utilizadas (YE; SONG; LI, 2012), aplicando técnicas estatísticas básicas ou avançadas aos dados obtidos de estudos publicados anteriormente, como livros, procedimentos e revistas (COBO et al., 2011). A grande maioria das análises bibliométricas têm em comum suas fontes de dados: o *Web of Science*¹ (WoS) da Thomson Reuters e o *Scopus*² da Elsevier, mesmo que, para avaliação de pesquisas exista uma tendência em favorecer as Ciências Naturais e Engenharia, bem como a Pesquisa Biomédica, em detrimento das Ciências Sociais e Artes e Humanidades. Da mesma forma, as revistas em inglês são super-representadas em detrimento de outras línguas, conforme citado por Mongeon e Paul-Hus (2016).

Assim, para realizar a bibliometria neste estudo foi realizada a busca na base internacional *Scopus*, dividindo a pesquisa em duas etapas: primeiro, é verificado a evolução com relação a palavra chave, resumo e título de artigo dos termos Manutenção com AHP ou *Analytic Hierarchy Process*, Manutenção com MAUT ou *Multi Attribute Utility Theory*, Manutenção com Lógica *Fuzzy* durante o período de

¹ Base de dados com aproximadamente 11.400 periódicos em mais de 45 idiomas diferentes nas áreas das ciências, ciências sociais, artes e humanidades, executa buscas relevantes e de alta qualidade na área de interesse, ligando os registros mais pertinentes por meio das referências citadas e explorando as conexões de assunto entre os artigos que são estabelecidas pelo pesquisador especialista (JOSHI, 2016).

² Banco de dados multidisciplinar com citações e resumos de publicações de revistas especializadas, revistas especializadas, livros, registros de patentes e publicações de conferências. Ele fornece ferramentas para rastrear, analisar e visualizar resultados de pesquisa. Scopus lançado em novembro de 2004. É o maior banco de dados de resumos e citações. Com mais de 21.500 títulos de mais de 5.000 editores internacionais, o Scopus oferece uma visão mais abrangente da produção mundial de pesquisas nas áreas de ciência, tecnologia, medicina, ciências sociais e artes e humanidades (JOSHI, 2016).

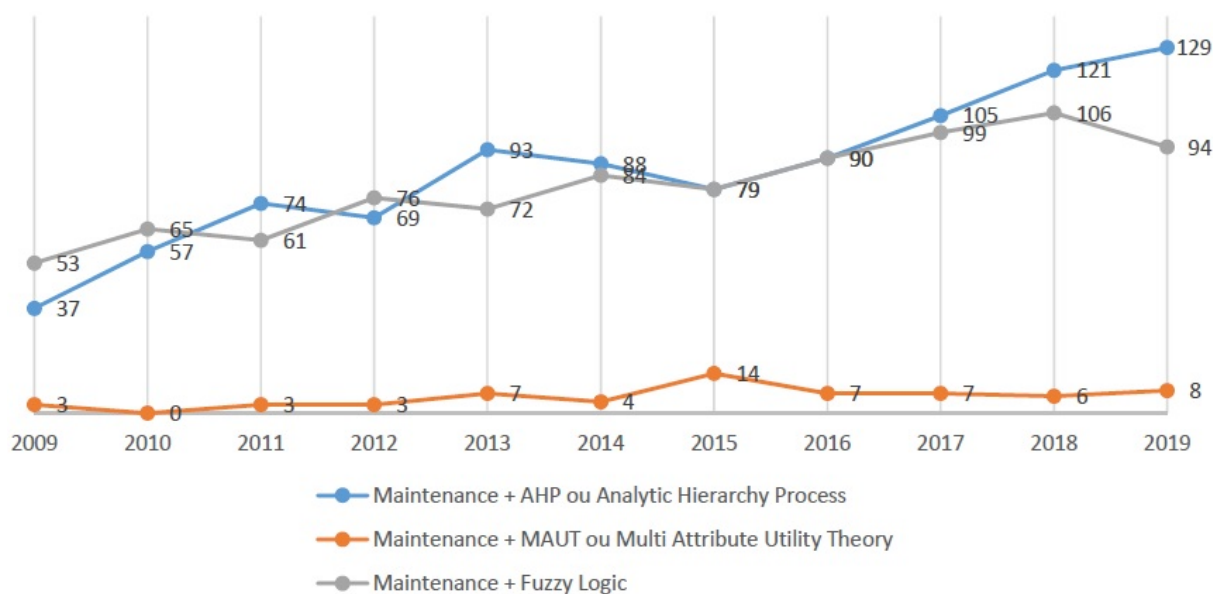
2009 à 2019 e segundo, a combinação destes três termos. A Tabela 1 contempla a evolução no número de trabalhos por ano encontrados com as palavras chave, resumos e título de artigo nesta pesquisa e com estes dados, foi ilustrado na Figura 1.

Tabela 1 – Dados encontrados na pesquisa bibliométrica

	Maintenance+AHP	Maintenance+MAUT	Maintenance+Fuzzy Logic
2019	129	8	94
2018	121	6	106
2017	105	7	99
2016	90	7	90
2015	79	14	79
2014	88	4	84
2013	93	7	72
2012	69	3	76
2011	74	3	61
2010	57	0	65
2009	37	3	53

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 1 – Número de publicações no período de 2009 a 2019 por palavra chave



Fonte: Scopus (2019).

Esta pesquisa encontrou 928 trabalhos envolvendo as palavras *Maintenance + AHP* ou *Analytic Hierarchy Process*, 62 trabalhos envolvendo as palavras *Maintenance + MAUT* ou *Multi Attribute Utility Theory* e 876 trabalhos envolvendo as palavras *Maintenance + Fuzzy Logic*. Não foi encontrado nenhum trabalho envolvendo a combinação das quatro palavras chave, caracterizando esta como uma possível lacuna na literatura referente a análise multicritério com incerteza aplicada a gestão da manutenção industrial. A Tabela 2 referencia os artigos científicos que obtiveram a maior citação por palavra chave, a quantidade de vezes que ele é citado, os autores, o ano e a fonte do trabalho.

Tabela 2 – Artigos mais citados por palavra chave.

Palavra Chave	Mais Citado	Referência
<i>Maintenance + AHP</i>	100	ARUNRAJ; MAITI. Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming, 2010.
<i>Maintenance + MAUT</i>	81	FERREIRA; ALMEIDA; CAVALCANTE. A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis, 2009.
<i>Maintenance + Fuzzy Logic</i>	144	OTAL; ALONSO; VERIKOUKIS. Highly reliable energy-saving MAC for wireless body sensor networks in healthcare systems, 2009.

Fonte: Elaborado pelo autor.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar uma proposta de análise da imprecisão e da incerteza nos problemas da gestão da manutenção industrial, incorporando todas as influências das incertezas inerentes ao processo de gestão da manutenção industrial com a aplicação de métodos e técnicas de análise multicritério. Para complementar este objetivo, a pesquisa desenvolve os seguintes objetivos específicos:

1. Definir o escopo e protocolo da pesquisa para procurar identificar na literatura as principais publicações sobre o tema, avaliá-las e selecionar as mais relevantes;
2. Identificar as principais estratégias para a gestão da manutenção e elaborar sua estrutura hierárquica;
3. Fazer os julgamentos dos valores pelos gestores que tomam as decisões da manutenção industrial e aplicar as estratégias de decisão multicritério selecionadas;
4. Analisar a consistência dos resultados e apresentá-los por meio de uma matriz decisória comparativa, para expor as vantagens e desvantagens de cada método e realizar as devidas conclusões.

1.3 MÉTODO DE PESQUISA

Thomé, Scavarda e Scavarda (2016) utilizam-se de um método de abordagem para revisão da literatura que consiste nos seguintes oito passos: (i) planejar e formular o problema; (ii) pesquisar na literatura; (iii) coleta de dados; (iv) avaliação qualitativa; (v) análise e síntese de dados; (vi) interpretação; (vii) apresentar resultados; e (viii) atualização da revisão. Cada etapa principal compreende subetapas ou tarefas específicas, expostas na Figura 2.

Na gestão de operações e engenharia de produção, a classificação que normalmente se utiliza é com relação ao escopo da pesquisa, considerando também outros tipos de desenvolvimentos, tais

como os trabalhos teórico-conceituais, os de modelagem e simulação, dentre outros (FILIPPINI, 1997). Bertrand e Fransoo (2002) e Morabito et al. (2018) classificam uma pesquisa científica segundo sua natureza, objetivo, forma de abordar o problema e método.

Com relação a natureza da pesquisa, básica ou aplicada, ela se enquadra de forma aplicada, pois seu estudo é dedicado à geração de conhecimento para solução de problemas específicos, é dirigida à busca da verdade para determinada aplicação prática em situação particular existente.

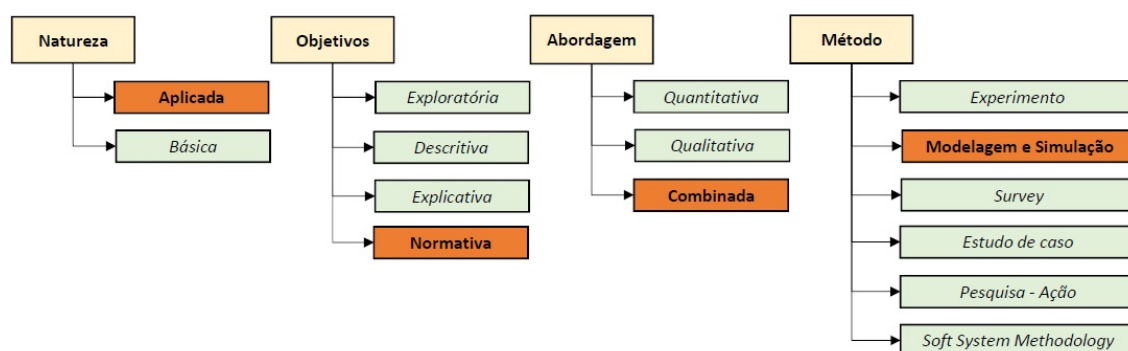
Do ponto de vista de seus objetivos, uma pesquisa pode ser classificada em descritiva, exploratória, explicativa ou normativa. O trabalho enquadra-se melhor como normativa, pois sua base é a construção de um caminho ou modelo.

Com relação a forma de abordagem do problema, a pesquisa pode ser quantitativa, qualitativa ou combinada. Observa-se que o estudo evidências qualitativas e quantitativas, sendo que o principal argumento para desenvolver uma pesquisa a partir da abordagem combinada é consubstanciar a análise, explorando ao máximo a realidade pesquisada e extraindo a maior quantidade possível de informações do banco de dados obtido, algo que é visto nesse estudo.

Do ponto de vista dos métodos de procedimento, pode-se classificar uma pesquisa como experimental, modelagem e simulação, *survey*, estudo de caso, pesquisa ação ou *soft system methodology*. Devido a utilização de modelos matemáticos para descrever o funcionamento do sistema ou parte de um sistema produtivo e também do uso de técnicas computacionais para simular o funcionamento de sistemas produtivos a partir de modelos, esta pesquisa pode ser classificada como modelagem e simulação.

Assim, Bertrand e Fransoo (2002) e Morabito et al. (2018) classificam a pesquisa conforme a Figura 2.

Figura 2 – Classificação da pesquisa.



Fonte: Adaptado de Bertrand; Fransoo (2002) e Morabito et al.(2018).

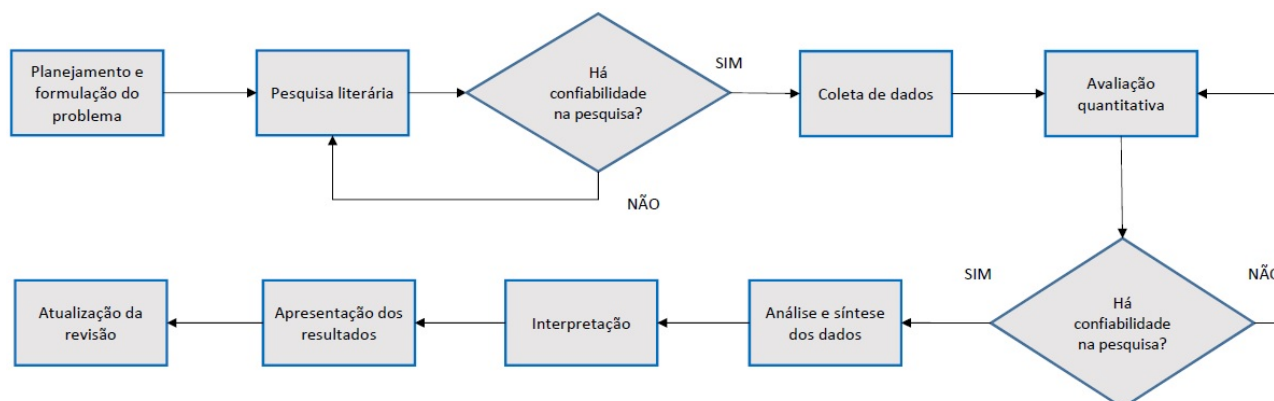
Conforme Thomé, Scavarda e Scavarda (2016), um protocolo para a revisão sistemática da literatura em estudos de gestão de operações contém os seguintes passos:

1. Planejamento e formulação do problema: é a parte que compreende a identificação de necessidades e a constituição da equipe de pesquisa. Também é onde define-se o objetivo da pesquisa, faz a avaliação do tema conforme a teoria, define-se as questões de pesquisa, os conceitos e modo operacional, há também a definição das categorias e resultados, a definição da proposta e dos protocolos da pesquisa.

2. Pesquisar literária: neste passo há a seleção de periódicos ou banco de dados. Realiza-se a pesquisa por palavra-chave, faz a análise dos resumos e é aplicado os critérios para inclusão ou exclusão do texto. Em seguida é feita uma análise completa do texto, executa-se os métodos de pesquisa *backward/forward* e é feito o treinamento do codificador para aumentar a confiabilidade e qualidade da assistências com relação as discrepâncias e taxas de variação.
3. Coleta dos dados: aqui inclui o estudo das descrições da amostragem, a natureza e tamanho das intervenções no estudo. Na metassíntese, a coleta de dados é frequentemente organizada com o uso da matriz de estudo, fazendo com que seja necessário um treinamento extensivo dos codificadores do processo antes da coleta de dados.
4. Avaliação qualitativa: é o ajuste entre o objetivo do estudo, sua concepção e implementação. Há uma distinção importante entre a qualidade metodológica do estudo e a qualidade dos resultados do relatório. Relatórios inadequados podem afetar a avaliação da qualidade metodológica, onde três categorias de riscos devem ser incluídas nas avaliações: (i) viés de publicação, levando à exclusão de estudos potencialmente relevantes; (ii) metodologia de pesquisa inadequada ou aplicações metodológicas incorretas; e (iii) viés durante o relato seletivo de estudos primários. Após esta avaliação, é feito a verificação da confiabilidade da pesquisa para garantir a replicabilidade do processo e mensurar o quão próximos os codificadores estão de acordo sobre os conceitos para selecionar os estudos, classificar os métodos e apresentar os resultados.
5. Análise e síntese de dados: o processo que leva uma coleção de pesquisa primária a uma síntese de pesquisa evolui da análise à síntese, à compreensão e, finalmente, ao conhecimento (HART, 1998). Não há uma receita universal para a análise. Os dados contextuais da unidade de análise, como ano de publicação, periódicos, autores e características relevantes para a síntese inclui o estudo e a descrição do processo. Eles são um elemento comum na revisão sistemática qualitativa e quantitativa da literatura.
6. Interpretação: segundo Hart (1998), a compreensão vem com a interpretação da síntese e com argumentos que descrevem, discutem e explicam todo o objeto de pesquisa. O conhecimento é finalmente gerado pela percepção dos princípios, métodos e eventos, aprendendo com a "experimentação sobre o significado dos conceitos e sua aplicação".
7. Apresentação dos resultados: as diretrizes para a publicação e o padrão dos relatórios para uma revisão sistemática da literatura existem em abundância nas áreas das ciências. O relatório devem conter pelo menos um resumo estruturado, com uma introdução que indique as justificativas, as questões e objetivos da pesquisa, como também tópicos que detalhem os métodos, os resultados, as discussão e a conclusão da pesquisa.
8. Atualização da revisão: atualizações nos resultados são regularmente incluídas como obrigatórias em todos os protocolos, pois enfatizam a necessidade de atualizar os resultados, tendo em vista que o efeito e as relações de interesse podem variar conforme novas evidências são agregadas com a inclusão de novos estudos.

Deste modo, o fluxograma para o desenvolvimento da revisão bibliométrica da pesquisa é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma de desenvolvimento da revisão bibliométrica.



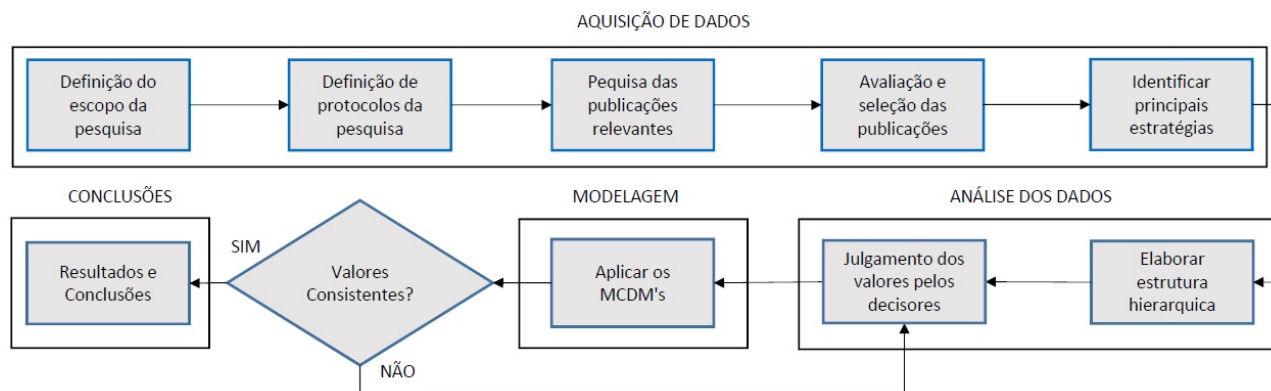
Fonte: Adaptado de Thomé; Scavarda; Scavarda (2016).

O desenvolvimento desta pesquisa consiste em quatro etapas principais, a iniciar-se pela:

1. Aquisição de dados: inicia-se a pesquisa pela definição do escopo do projeto, pois é de grande importância que os itens que serão investigados e analisados sejam explicitados. Também é importante a definição dos protocolos da pesquisa, para que seja feita a transcrição do método científico à pergunta formulada pelo pesquisador. Em seguida é feita a pesquisa das publicações mais relevantes, sua avaliação e a seleção das publicações e por fim identificar as principais métodos multicritérios.
2. Análise de dados: etapa importante onde busca-se compreender o significado dos dados coletados e também tem o objetivo de facilitar o entendimento dos conteúdos. Neste estudo, a análise dos dados é classificada como de natureza qualitativa pois provem de entrevistas, observações e questões abertas em questionários. Assim, construindo a estrutura hierárquica do problema, é possível que os tomadores de decisão façam os julgamentos.
3. Modelagem: A terceira etapa faz-se uso da modelagem dos dados. A aplicação do MCDM deve-se ao fato de que além do método considerar mais de um critério, algumas alternativas são avaliadas segundo um número de critérios definidos, sendo que cada critério induz a uma ordenação particular das alternativas, fazendo com que seja necessária a adoção de algum mecanismo capaz de construir uma ordenação geral de preferências, também chamada de ranking ou classificação.
4. Conclusões: etapa que representa o final das informações apresentadas no estudo e discutidas com base nas premissas, nos objetivos, na revisão de literatura e nos dados coletados. A conclusão deve ser breve, concisa e precisa, com as respostas aos objetivos. Deve ser bem definidas e claras, sem suposições ou opiniões e sem dados e também pode haver resultados mais gerais, para tornar mais objetiva uma afirmação.

Assim, a Figura 4 ilustra o fluxograma da pesquisa, onde contempla-se todas as etapas de desenvolvimento do estudo.

Figura 4 – Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Quanto ao objeto de estudo, a delimitação da pesquisa será a análise multicritério aplicada à gestão da manutenção industrial.

Quanto a área de atuação, o estudo serão feitos em uma indústria metalúrgica, com opiniões de diferentes gestores das decisões de manutenção e a utilização de métodos de decisão multicritério.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos nesta dissertação de mestrado, esta tese foi estruturada em cinco capítulos, subdivididos em seções e subseções.

O primeiro capítulo contempla a introdução do tema da pesquisa. É apresentada as justificativas da pesquisa, o contexto no qual está inserido o objeto do estudo e o panorama na qual está a problemática a ser tratada. Para complementar o capítulo e enfatizar a relevância da pesquisa, é acrescido uma análise bibliométrica do assunto por período e palavra chave, uma apresentação dos objetivos que a pesquisa pretende convergir, uma delimitação da pesquisa e a classificação, a estruturação e as etapas de desenvolvimento da pesquisa.

No segundo capítulo é apresentado o referencial teórico, onde é abordado os tópicos necessários para a compreensão do estudo. O conceito de manutenção, o histórico da gestão da manutenção, os tipos de manutenção comumente classificados, a as abordagens da gestão da manutenção e a gestão das peças de manutenção sobressalentes são expostos neste capítulo.

Para o terceiro capítulo é abordada as bases para a modelagem multicritério, com a contextualização do problema de pesquisa e a definição da estruturas hierárquicas, a apresentação dos métodos de tomada de decisão multicritério e dos conjuntos nebulosos pela abordagem *fuzzy*, onde, a partir da literatura, serão discutidos os conceitos fundamentais associados à teoria dos métodos AHP, *Fuzzy* AHP, MAUT e *Fuzzy* MAUT. A finalidade é, além de dar uma base nas definições empregadas nos capítulos seguintes, é rever a seqüência básica de procedimentos teóricos e empíricos para a validação destes conceitos através da apresentação de dois exemplos de aplicação prática da teoria.

No quarto capítulo apresenta o método para a obtenção dos resultados, começando com a coleta de dados sobre as gestão da manutenção na empresa metalurgica em estudo. Da coleta de dados

com enfoque nas estratégia de manutenção, é aplicado o método AHP e na sequência, a ferramenta *fuzzy* no AHP. Em ambos os casos, o foco é analisar como os especialistas que gerenciam as decisões de manutenção priorizam os critérios e os subcritérios. E para os métodos MAUT e *Fuzzy* MAUT, foi coletada as opiniões de preferência dos mesmos especialistas a respeito da gestão das peças sobressalentes da manutenção sendo que, para ambos os problemas, foram apresentados os critérios e subcritérios, formulários e matrizes de decisão para cada procedimentos utilizados nas abordagens para a execução deste trabalho para chegar a um valor final.

No quinto e último capítulo são expostas as considerações finais obtidas no estudo, a verificação se os objetivos e as questões da pesquisa foram respondidas. Também é apresentado as contribuições da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este Capítulo tem como objetivo abordar os tópicos que possuem significativa relação com a proposta da dissertação e dessa forma, proporcionar conhecimento para uma melhor compreensão dos assuntos relacionados com o tema do trabalho. Assim, os tópicos abordados serão a manutenção, com seu histórico, tipos de manutenção, a gestão da manutenção, o planejamento e controle da manutenção e a gestão de peças sobressalentes (*spare parts*).

2.1 MANUTENÇÃO

Manutenção é o termo usado para abordar a maneira pela qual as organizações tentam evitar falhas cuidando de suas instalações físicas (SLACK; BRANDON-JONES, 2018). Segundo Moubray (2001), o objetivo da manutenção é assegurar que os itens físicos continuem a fazer o que seus usuários desejam que eles façam, ou seja, que mantenham sua capacidade funcional de operação.

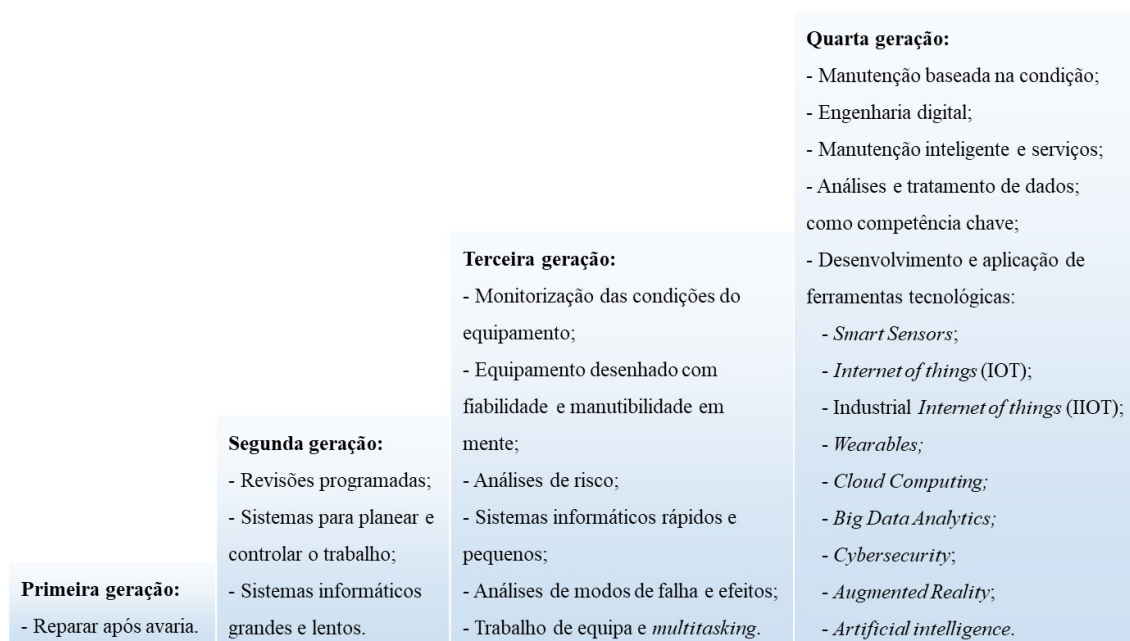
As atividades de manutenção são de fundamental importância para uma operação segura e eficiente de qualquer planta industrial. A mistura dos aspectos de segurança e confiabilidade da planta com as questões relacionadas ao desempenho econômico, como receitas de produção, custos de reparo e manutenção, torna o problema de gerenciar atividades de manutenção altamente complicado, especialmente para sistemas complexos com muitos componentes. Este problema é um típico conflito entre os requisitos de segurança e as necessidades econômicas (JARDINE; TSANG, 2013).

Por exemplo, frequentes ações de manutenção aumentam a confiabilidade e a disponibilidade do sistema (negligenciando o tempo de inatividade e desconsiderando possíveis falhas devido às ações de manutenção), mas os custos também são aumentados. Além disso, atividades eficazes de manutenção exigem um número significativo de equipes técnicas estejam presente no local o tempo todo, de modo a estar pronto para intervir quando necessário. Os salários dos reparadores aumentam os custos totais do sistema, mas reduzir as equipes de reparo no local ou recorrer a equipes externas pode levar a grandes perdas de produção devido ao tempo de inatividade do sistema, pois as ações de reparo podem não estar disponíveis quando necessário. Esses exemplos mostram claramente que as decisões sobre a logística das atividades de reparo e manutenção devem ser o resultado de um estudo de otimização (MARSEGUERRA; ZIO, 2000).

2.1.1 Histórico da Gestão da Manutenção

Para Moubray (2001), a evolução histórica da manutenção pode ser dividida em três gerações distintas: Primeira Geração (Mecanização); Segunda Geração (Industrialização); e Terceira Geração (Automatização). Alguns autores, como Dunn (2003) e Kardec e Nascif (2012), já consideram uma Quarta Geração da manutenção, onde o termo “Manutenção” vem sendo gradativamente substituído por “Gestão de Ativos” e incluem os conceitos de estatística e análise de risco, tendo na Disponibilidade, Confiabilidade e Manutenibilidade as três maiores justificativas de sua existência, como demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Evolução das técnicas de manutenção.



Fonte: Adaptado de Moubray (2001) e Kardec; Nascif (2012).

De acordo com Moubray (2001), a primeira geração da manutenção abrange o período até a Segunda Guerra Mundial, onde a indústria não era altamente mecanizada, portanto os períodos de paralização à espera de recuperação de falhas não eram muito importantes. Isto significava que a prevenção contra falhas no equipamento não era uma prioridade alta. Ao mesmo tempo, a maioria dos equipamentos era simples e muito deles superdimensionados, tornando-os confiáveis e de fácil manutenção. Consequentemente, não era necessária uma manutenção sistemática e nem pessoal especializado para esta função.

Na segunda geração, as coisas mudaram dramaticamente. Durante a Segunda Guerra Mundial, a demanda por bens de todos os tipos aumentaram, levando a um aumento da mecanização. Por volta da década de 1950, máquinas de todos os tipos eram mais numerosas e complexas, fazendo com que a indústria comece a depender delas. Com esta dependência, o tempo de paralização começa a ser importante, levando a idéia de que as falhas dos equipamentos poderiam e deveriam ser evitadas, resultando no conceito de manutenção preventiva e que nos anos de 1960 consistia em revisões gerais dos equipamentos feitas a intervalos fixos. O custo de manutenção também começou a se elevar muito, levando o crescimento dos sistemas de planejamento e controle de manutenção. O montante de capital investido em ativos, juntamente com o nítido aumento do custo do capital levaram as pessoas a começar a buscar meios para aumentar a vida útil dos ativos (MOUBRAY, 2001).

A terceira geração se inicia nos anos de 1970. Durante esse período, os padrões de segurança e os danos ao meio ambiente foram considerados mais eficazes, a tecnologia automatizada, uma alta redundância, estoques *just-in-time*, sistemas complexos, altos investimentos de capital e produtos personalizados MOUBRAY (2001) explica que as expectativas de manutenção para a terceira geração eram de uma maior disponibilidade e confiabilidade dos ativos físicos, uma maior vida útil dos equipamentos uma maior segurança operacional, uma melhor qualidade dos serviços e produtos, a ausência de danos ao meio ambiente, uma melhor relação entre custo e benefício dos processos

e uma maior produtividade, competitividade e lucratividade. As técnicas e procedimentos mais utilizados são o monitoramento de condições e parâmetros operacionais de processos, a inclusão da confiabilidade e manutenibilidade nos projetos, a análise de riscos, modos de falhas, causas e efeitos e a microinformática versatilidade e teamwork. As políticas e filosofias de manutenção predominantes são a Preditiva, o *Total Productive Maintenance* (TPM) e a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) ou *Reliability Centered Maintenance* (RCM).

Na quarta geração há uma consolidação das atividades de Engenharia da Manutenção, que tem na Disponibilidade, Confiabilidade e Manutenibilidade as três maiores justificativas de sua existência. A manutenção prioriza a minimização de falhas prematuras, por isso a análise de falhas é uma metodologia consagrada como capaz de melhorar a performance dos equipamentos e da empresa. A manutenção preditiva é cada vez mais utilizada, há uma tendência na redução do uso da manutenção preventiva, uma vez que ela demanda paralização dos equipamentos e sistemas, e a manutenção corretiva não-planejada se torna um indicador da ineficácia da manutenção. A interação entre as áreas de engenharia, manutenção e operação é um fator de garantia de metas. Por fim, uma grande mudança dessa geração foi o aprimoramento da terceirização, buscando uma relação de parceria de longo prazo (KARDEC; NASCIF, 2012).

2.1.2 Tipos de Manutenção

A importância da manutenção para os sistemas de manufatura, especialmente para sistemas contínuos, leva a criar várias estratégias de manutenção. E cada estratégia de manutenção tem suas forças e fraquezas. Além disso, cada estratégia de manutenção é aplicável a um sistema de fabricação específico. De fato, não existe uma estratégia de manutenção perfeita, sendo que a seleção de uma estratégia ou uma combinação adequada de estratégias se tornou um dos problemas mais importantes para os gerentes de manutenção. Selecionar uma estratégia ou combinação delas é um desafio importante para os gerentes industriais (SHAHIN; SHIROUYEHZAD; POURJAVAD, 2012).

Embora não haja concordância absoluta na literatura sobre a classificação dos tipos de manutenção, pode-se distinguir amplamente entre três categorias: manutenção que ocorre quando há uma falha; manutenção preventiva com base no tempo, que define determinadas atividades quando um período definido passa; e manutenção baseada na condição (ou *Condition-Based Maintenance* - CBM), que recomenda ações de acordo com o estado de saúde atual e futuro do sistema de fabricação, baseado em dados coletados por meio do monitoramento de condições (JARDINE; LIN; BANJEVIC, 2006). São elas: manutenção corretiva (planejada e não-planejada), manutenção preventiva, manutenção preditiva e manutenção proativa.

2.1.2.1 Manutenção Corretiva

Esta estratégia de manutenção também é conhecida como operar/executar até falhar (IOANNIS; NIKITAS, 2013) ou manutenção baseada na falha (CHAN; PRAKASH, 2012). Ao atuar em um equipamento que apresenta um defeito ou um desempenho diferente do esperado, é realizada manutenção corretiva, mostrando que a manutenção corretiva não é necessariamente a manutenção de emergência (KARDEC; NASCIF, 2012).

Convém também observar que existem duas condições específicas que levam à manutenção corretiva: quando o equipamento apresenta desempenho deficiente apontado pelo acompanhamento das variáveis operacionais e quando há a ocorrência de falha. Então, pode-se dividir a manutenção corretiva em duas classes: a manutenção corretiva não planejada, onde ocorre a falha de maneira aleatória, caracterizando-se pela atuação da manutenção em um fato já ocorrido, seja este uma falha ou um desempenho menor que o esperado e sem tempo para a preparação do serviço e a manutenção corretiva planejada, onde a característica principal é função da qualidade da informação fornecida pelo acompanhamento do equipamento. Mesmo que a decisão gerencial seja de deixar o equipamento funcionar até a quebra, esse é uma decisão conhecida e algum planejamento pode ser feito quando a falha ocorrer (KARDEC; NASCIF, 2012).

2.1.2.2 Manutenção Preventiva

Esse tipo de manutenção busca aumentar a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos, reduzindo falhas, evitando a necessidade de manutenção corretiva não planejada. O objetivo desse tipo de manutenção é a prevenção de problemas e falhas, buscando a correção de falhas antes que elas ocorram (FARIA; COSTA; OLIVAS, 2015).

Devido a ações preventivas, a substituição de peças pode ocorrer prematuramente, sem que haja necessidade de troca. Também não impede que ocorra falhas no equipamento, uma vez que a manutenção preventiva deve ser realizada em intervalos de tempo específicos, baseados na experiência da equipe de manutenção, dos gerentes da empresa, de estudos estatísticos ou de acordo com as recomendações dos manuais de equipamentos, sempre considerando as necessidades da empresa (FARIA; COSTA; OLIVAS, 2015).

Para Kardec e Nascif (2012), inversamente à política de manutenção corretiva, a manutenção preventiva procura obstinadamente evitar a ocorrência de falhas, ou seja, procura prevenir. Em determinados setores, como na aviação, a adoção de manutenção preventiva é imperativa para determinados sistemas ou componentes, pois o fator segurança se sobrepõe aos demais.

2.1.2.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva às vezes chamada de "monitoramento *on line*", "manutenção baseada em condições" ou "manutenção baseada em riscos", possui uma longa história. Desde a inspeção visual, que é o método mais antigo e ainda assim uma das manutenções preditivas mais poderosas e amplamente utilizadas, ela evoluiu para métodos automatizados que usam técnicas avançadas de processamento de sinal baseadas no reconhecimento de padrões, incluindo redes neurais, lógica *fuzzy* e modelagem empírica e física baseada em dados. Quando o equipamento começa a falhar, ele pode exibir sinais que podem ser detectados se olhos, ouvidos e narizes afiados forem usados para detectar os precursores da falha. Felizmente, existem sensores que identificam o início de degradações e falhas do equipamento, fazendo com que a integração desses sensores às técnicas de manutenção preditiva evite a substituição desnecessária de equipamentos, economizar custos e melhorar a segurança, disponibilidade e eficiência do processo (HASHEMIAN; BEAN, 2011).

Para Faria, Costa e Olivas (2015), este tipo de intervenção significa uma manutenção com foco na previsão de falhas, através de um acompanhamento em uma sistemática específica de parâmetros e condições do equipamento. Esse tipo de manutenção não surgiu como um substituto para a manutenção corretiva e preventiva, mas como uma ferramenta adicional, que busca minimizar, através do monitoramento de parâmetros específicos, os custos de manutenção e perdas em equipamentos.

Sua principal função é coletar dados com o equipamento em operação, gerando uma mínima interferência em sua operação. Através dos dados coletados, um diagnóstico e uma análise de tendências devem ser realizados, identificando possíveis problemas por meio da análise histórica de equipamentos similares e do conhecimento adquirido ao longo do tempo. Diversas variáveis podem ser monitoradas, como densidade, vazão, pressão, vibração, temperatura, tensão, corrente, resistência elétrica, capacitância, indutância, entre outras (FARIA; COSTA; OLIVAS, 2015).

2.1.2.4 Manutenção Proativa

A manutenção proativa se concentra principalmente em determinar as causas principais da falha da máquina e em lidar com esses problemas antes que os problemas ocorram. A antecipação é fundamental nos programas de manutenção proativa, pois comissiona ações corretivas voltadas para as fontes de falha. A manutenção proativa é voltada para detectar a contaminação de fluidos e lubrificantes usados nas máquinas ou no caso de transformadores de potência, o monitoramento rigoroso das condições do óleo impedirá a ocorrência de problemas que exija a substituição de componentes (manutenção preventiva) ou monitoramento das condições estabelecidas para possíveis avarias, como vibração e calor (manutenção preditiva) (FARIA; COSTA; OLIVAS, 2015). Para alguns outros componentes, monitores de condição ou sensores são instalados para medir a vida útil consumida do componente e auxiliar no agendamento de ações de manutenção (MOUBRAY, 2001).

A RCM é uma abordagem de manutenção proativa e usada dentro das indústrias que determina sistematicamente o que deve ser feito para garantir que o sistema continue desempenhando sua função adequadamente (MOUBRAY, 2001). Kardec e Nascif (2012) dizem também que esse modelo de manutenção pode ser aplicado antes, no decorrer ou após a instalação de qualquer máquina na linha de produção, e não necessariamente utilizar quando houver algum tipo de falha ou parada.

2.1.3 Gestão da Manutenção

A missão da gestão em manutenção é garantir eficiência e funcionalidade dos equipamentos e instalações para que o processo de produção ocorra com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custo adequados (KARDEC; NASCIF, 2012). Diversas abordagens de gestão de manutenção têm sido propostas e cada uma delas com distintos graus de sucesso ou insucesso nas suas aplicações. As três concepções mais publicadas e usadas nas empresas são: Manutenção Centrada na Confiabilidade - MCC, Manutenção Produtiva Total – TPM (*Total Productive Maintenance*) e Manutenção Centrada no Risco – RBM (*Risk Based Maintenance*) (FUENTES, 2006).

2.1.3.1 Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance* - TPM)

Foi desenvolvida na indústria Japonesa a partir dos anos de 1970 com o principal objetivo de envolver os operadores fabris nas atividades de manutenção, de forma a responsabilizá-los pelo desempenho dos seus equipamentos (KARDEC; NASCIF, 2012).

Considerada como a ciência médica das máquinas, a TPM é um programa de manutenção que envolve um conceito recém-definido para manutenção de plantas e equipamentos. O objetivo do programa é aumentar significativamente a produção e, ao mesmo tempo, aumentar o moral dos funcionários e a satisfação no trabalho, resultando em uma maximização da eficácia dos equipamentos, desenvolvendo um sistema de grande eficiência para toda a vida útil dos equipamentos, envolvendo a parte executiva, de planejamento, de projeto e manutenção de equipamentos, promovendo a melhoria contínua envolvendo os funcionários pelo gerenciamento da motivação (SHAHIN; ATTARPOUR, 2011). A TPM traz manutenção para foco, como uma parte necessária e de vital importância ao negócio, não mais considerada uma atividade sem fins lucrativos. O tempo de inatividade para manutenção é programado como parte da fabricação (CHAN et al., 2005).

2.1.3.2 Manutenção Centrada na Confiabilidade (*Reliability Centered Maintenance* - RCM)

Uma investigação pioneira, conduzida por F. Stanley Nowlan e Howard F. Heap da United Airlines culminou numa publicação em 1978 intitulada de “*Reliability Centered Maintenance*” - (RCM). Tal investigação teve como objetivo monitorizar as falhas de várias centenas de componentes mecânicos, elétricos e estruturais dos aviões, tendo sido concluído que à medida que os componentes envelheciam identificavam-se com um determinado padrão de falha (DUNN, 2003).

Segundo Rausand e Vatn (2008), o RCM foi projetado para equilibrar os custos e benefícios para se obter um programa de Manutenção Preventiva (MP) mais econômico, mas para alcançar isso, os padrões de desempenho do sistema desejados devem ser especificados.

Para Moubray (2001) a definição formal do RCM é: “Processo usado para determinar o que precisa ser feito para assegurar que qualquer ativo continue a atender as necessidades dos usuários, no seu contexto operacional atual”, e sua filosofia: “Não basta executar certo as tarefas de manutenção, é preciso executar certo as tarefas certas”. Ainda para Moubray (2001), o processo de RCM implica em sete perguntas sobre cada um dos itens sob revisão ou sob análise crítica, como a seguir:

- a) Quais são as funções e padrões de desempenho de um ativo no seu contexto presente de operação?
- b) De que forma ele falha em cumprir suas funções?
- c) O que causas cada falha funcional?
- d) O que acontece quando ocorre cada falha?
- e) De que forma cada falha importa?
- f) O que pode ser feito para predizer ou prevenir a falha?
- g) O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa pró ativa apropriada?

2.1.3.3 Manutenção Centrada no Risco (*Risk Based Maintenance* - RBM)

A análise de risco é uma técnica para identificar, caracterizar, quantificar e avaliar a perda de um evento. Essa abordagem integra a probabilidade com a consequência e pode ser definida quantitativa e qualitativamente como a probabilidade de falha multiplicada pela gravidade das consequências. A estratégia de manutenção baseada em risco, que surgiu no gerenciamento de instalações industriais nos anos de 1990, fornece uma nova visão para o gerenciamento de integridade de ativos. Essa abordagem usa o "nível de risco" como critério para planejar tarefas de manutenção e tem recebido crescente atenção dos pesquisadores nos últimos anos (DICKERSON; ACKERMAN, 2016).

Garg e Deshmukh (2006) definem a Manutenção Baseada em Risco como um modelo de gestão dupla, sendo uma estratégia de manutenção sólida que minimiza os riscos causados por falha inesperada do equipamento e também uma estratégia de custos.

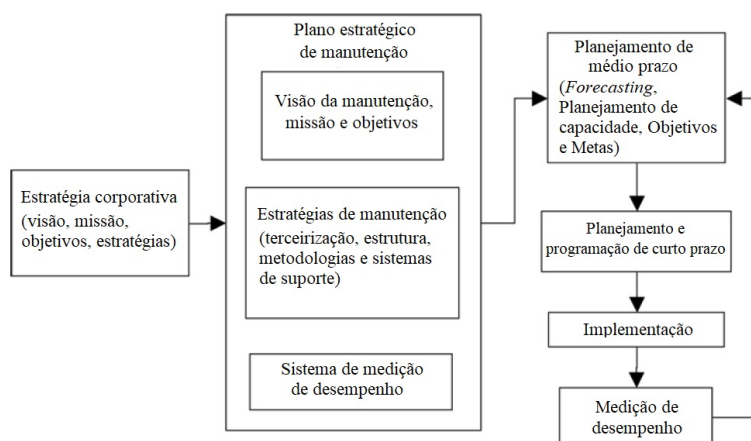
O principal objetivo dessa metodologia é reduzir o risco geral que pode trazer as falhas inesperadas nas instalações operacionais (KHAN; HADDARA, 2004). As atividades de inspeção e manutenção são priorizadas com base no risco quantificado causado por falha dos componentes, para que o risco total possa ser minimizado usando a manutenção baseada em risco. Os componentes de alto risco são inspecionados e mantidos geralmente com maior frequência e rigor e são mantidos de uma maneira maior, para atingir critérios de risco toleráveis (BROWN; MAY, 2000). Para Arunraj e Maiti (2007) a metodologia de manutenção baseada em risco consiste em seis módulos:

1. Análise de riscos: a análise é feita para identificar os modos de falha. As possibilidades de falha são desenvolvidas com base nas características operacionais do sistema, nas condições físicas sob as quais as operações ocorrem, no arranjo do sistema e na disposições dos sistemas de segurança.
2. Avaliação de probabilidade: o objetivo aqui é calcular a ocorrência do evento indesejado. A frequência da falha ou a probabilidade de falha por um período de tempo definido é calculada nesta etapa.
3. Avaliação das consequências: o objetivo aqui é quantificar as possíveis consequências do cenário de falha credível. As consequências são perda de produção, perda de ativos, perda ambiental e perda de saúde e segurança.
4. Estimativa do risco: com base no resultado da análise de consequências e da análise probabilística de falhas, o risco é estimado para cada unidade.
5. Aceitação dos riscos: o risco calculado é comparado com os critérios de aceitação de risco. Se algum risco na unidade ou componente exceder os critérios de aceitação, é necessária a manutenção para reduzir o risco.
6. Planejamento de manutenção: é necessário para minimizar a frequência e as consequências das falhas do sistema.

2.1.4 Planejamento e Controle da Manutenção (PCM)

O planejamento de manutenção composto por estratégias de médio e curto prazo, como descrito na Figura 6. A partir de um plano estratégico corporativo, a estratégia de manutenção é desenvolvida a partir do qual são extraídos os planos de médio e curto prazo (AL-TURKI, 2011).

Figura 6 – O planejamento de manutenção como parte do corporativo sistema de planejamento.



Fonte: Adaptado de Al-Turki (2011).

Al-Turki (2011) diz que um plano estratégico de manutenção, como qualquer outro plano funcional, deve ser consistente com a visão e os objetivos da empresa. Deve ser tratado de uma maneira diferente de outras áreas funcionais, diferindo da seguinte maneira:

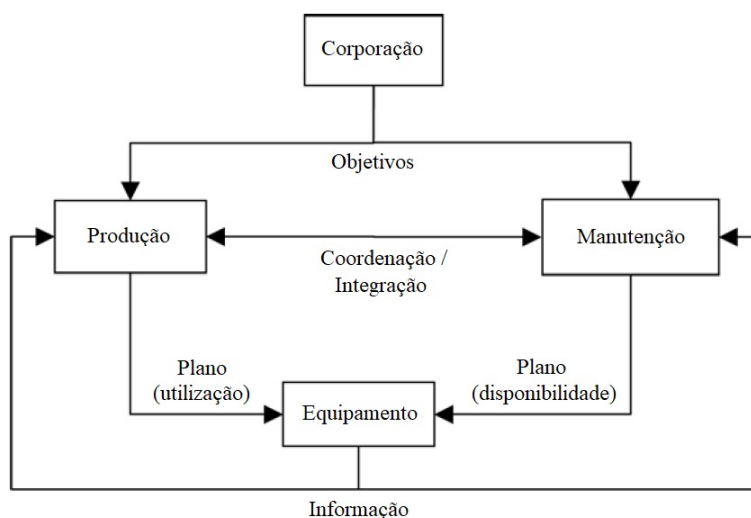
- a) A visão tradicional de manutenção como um centro de custo e não como um centro de lucro;
- b) A forte interconexão entre manutenção e gerenciamento dos principais ativos;
- c) A alta influência da manutenção nos objetivos corporativos por meio da aquisição e gestão dos ativos;
- d) A natureza de ser uma área altamente técnica e trabalhosa; e
- e) A natureza dos principais interessados (principalmente internos).

A estratégia de manutenção é desenvolvida com base nos objetivos corporativos e no entendimento claro do papel que a manutenção desempenha na estratégia corporativa e em objetivos claros que estão alinhados com os objetivos corporativos. Escolhas estratégicas devem ser feitas em relação à estrutura da organização, metodologias de manutenção, sistemas de suporte e decisões relacionadas à terceirização. Depois que as seleções são feitas, os planos de médio alcance devem ser feitos com relação ao planejamento de capacidade e força de trabalho (AL-TURKI, 2011).

A visão global da empresa em relação à produção e manutenção introduzida por Visser (1998) pode ser modificada para refletir a parceria entre as duas funções na utilização e manutenção do equipamento, como mostra a Figura 7. Essa visão forma a base para um planejamento estratégico mais liberal do ponto de vista da manutenção e consistente com o modelo introduzido por Murthy, Atrens e Eccleston (2002). Ambas as funções, produção e manutenção, precisam levar em consideração os objetivos da

cooperação em seu planejamento, bem como as perspectivas e visões de cada um em relação aos seus próprios planos.

Figura 7 – Interrelação entre produção e manutenção.



Fonte: Adaptado de Al-Turki (2011).

Embora o foco principal do planejamento seja satisfazer a demanda utilizando os recursos ao máximo, a manutenção se concentra em maximizar o valor do ativo e sua disponibilidade. Por isso, as informações que retornam das operações para a produção e manutenção em relação às condições do equipamento são essenciais para ajustar os planos e também revisar as decisões (AL-TURKI, 2011).

Mesmo que existam diferentes metodologias alternativas para o processo de planejamento estratégico, todas elas enfatizam o envolvimento das partes interessadas no processo usando diferentes ferramentas, como sessões de *brain storm* e focar em reuniões de grupo. Esta seção propõe uma estrutura para o desenvolvimento de um plano estratégico de manutenção baseado na visão global de manutenção apresentada na Figura 7 (AL-TURKI, 2011).

2.2 GESTÃO DE PEÇAS SOBRESSALENTES (*SPARE PARTS*)

A confiabilidade e a disponibilidade das plantas industriais representam um aspecto crítico em muitas organizações modernas de manufatura e serviços. O aumento da eficiência das plantas de produção requer a minimização do tempo de inatividade das máquinas. A disponibilidade de peças de reposição e sua rápida adesão estão entre os principais fatores que levam à redução da prolongação do tempo de inatividade quando ocorre uma falha (BRAGLIA; GRASSI; MONTANARI, 2004). Assim, devido ao elevado valor das mesmas e, por outro lado, aos elevados custos com a sua indisponibilidade, pequenas melhorias da gestão de estoque de peças sobressalentes é de grande utilidade e pode levar a melhorias significativas no desempenho da fábrica e na redução do investimento dos mesmos (OLIVEIRA; VAZ, 2016).

Segundo Teixeira, Lopes e Figueiredo (2018) a gestão de peças sobressalentes deve fornecer informações em tempo real sobre as peças, bem como adotar políticas de estocagem adequadas que visam garantir a disponibilidade em caso de necessidade e evitar que as quebras obriguem a parada da produção. Uma peça sobressalente desempenha um papel fundamental na gestão da manutenção,

e assim sendo, pode ter um forte impacto na produção. Para uma programação mais eficiente da manutenção, a gestão de estoque de peças sobressalentes deve envolver duas áreas de forma integrada, a manutenção e a logística.

Oliveira e Vaz (2016) dizem que existem dois métodos de abordagem para gerenciamento de peças sobressalentes para diminuir riscos: a abordagem por modelos matemáticos e a abordagens de classificação. Os modelos matemáticos baseiam-se na otimização de custos com estocagem e níveis de serviço associados a um potencial estoque de segurança, ponto de abastecimento e quantidade econômica de encomenda. Contudo, a maioria dessas metodologias são de alta complexidade e não consideram os vários fatores intangíveis relevantes para a gestão de estoque de peças sobressalentes, tais como a obsolescência, as características padrão das peças, a qualidade dos fornecedores, entre outros. Já a abordagem de classificação com multicritérios das peças sobressalentes representam uma ferramenta capaz de ultrapassar essas limitações.

Teixeira, Lopes e Figueiredo (2018) ainda propõem uma estrutura de tomada de decisão para a gestão de peças sobressalentes composta por cinco etapas sequenciais: codificação das peças, classificação das peças, previsão de procura das peças, políticas de gestão de estoque e teste e validação das políticas. Ele também afirma que em cada etapa, a definição de técnicas e metodologias deve ser apropriada de acordo com a empresa em estudo.

Também Teixeira, Lopes e Figueiredo (2018) afirmam que a classificação das peças sobressalentes é uma área de investigação relevante devido aos recursos financeiros e aos requisitos que envolve o serviço, sendo que na literatura existem principalmente duas metodologias de classificação da importância das peças sobressalentes: técnicas de único critério e técnicas de diversos critérios. Porém, reforça-se que a maioria das metodologias multicritério se apresenta com elevado grau de complexidade e de difícil aplicação à realidade industrial. Os mesmos autores informam que a classificação de peças sobressalentes pode ser realizada recorrendo a métodos quantitativos, métodos qualitativos, ou ambos.

Um procedimento simples, direto e frequentemente utilizado na indústria é a análise ABC. Segundo Bhattacharya, Sarkar e Mukherjee (2007), a análise ABC é uma abordagem de classificação de estoque que facilita as empresas a classificar seus itens de estoque em três classes, ou seja, A - muito importante, B - moderadamente importante e C - pelo menos importante, com base no valor monetário e na taxa de uso desses itens. Além da análise ABC clássica para a classificação do estoque de produtos acabados, as empresas também devem realizar a análise ABC para classificar suas peças sobressalentes a fim de evitar interrupções na produção. No entanto, apesar de ser de fácil implementação e entendimento, ele só é bem-sucedida quando a classificação considera um único critério. Alguns estudos mostraram que critérios de classificação, por exemplo, valor de custo e volume de demanda podem levar a soluções ineficientes e isso levou pesquisadores e profissionais a estender a classificação ABC tradicional para uma análise ABC de múltiplos critérios, incluindo outros parâmetros como custo unitário, taxa de falha e tempo de execução. Alguns trabalhos foram propostas para preencher a lacuna entre a pesquisa e a prática em gestão de peças de reposição, como gerar e integrar abordagens para a gestão de peças de reposição, definir diretrizes gerenciais de contingência, promover o acúmulo de conhecimento e complementar modelos teóricos com relevância prática (DURAN, 2015).

Outro método destacado por Teixeira, Lopes e Figueiredo (2018) é o FSN (*Fast moving, Slow*

moving e Non moving), um método quantitativo de critério único que se baseia na análise dos padrões de procura, focando-se na taxa de movimentação das peças sobressalentes e, portanto, útil para detectar as peças que já não se movem há muitos anos.

Quanto aos métodos qualitativos, Teixeira, Lopes e Figueiredo (2018) também destacam o método VED (*Vital, Essential, Desirable*) e o AHP (*Analytic Hierarchy Process*). O mesmo autor refere que o método de classificação VED baseia-se “no conhecimento do especialista de manutenção”, classificando a criticidade das peças como vitais, essenciais ou desejáveis. Porém, tal como referiu Duran (2015) a análise da criticidade das peças sobressalentes é uma tarefa de elevado grau de complexidade, principalmente devido aos seguintes três fatores:

- a) Elevado número de diferentes referências de peças sobressalentes em estoque;
- b) Existência de incompatibilidades entre critérios para realizar a classificação;
- c) Técnicos de manutenção com diferentes pontos de vista

Para ultrapassar essa limitação, Teixeira, Lopes e Figueiredo (2018) citam Gajpal, Ganesh e Rajendran (1994) no qual seu trabalho sugerem a aplicação do VED com um procedimento clássico de AHP. O método AHP permite que os gestores estruturam problemas complexos de forma hierárquica e integrada. Uma das principais vantagens deste método é a facilidade com que lida com os múltiplos critérios sendo de fácil entendimento e possibilidade de combinar dados qualitativos com dados quantitativos. Com o AHP é possível também combinar critérios relacionados com a logística e com a manutenção para analisar a criticidade das peças sobressalentes (DURAN, 2015).

A classificação de estoques assume um papel fundamental para a gestão de peças sobressalentes visto que permite agrupar as peças sobressalentes com as características semelhantes em classes e seleccionar adequadamente os métodos de previsão e políticas de stocks de acordo com os requisitos de nível de serviço e características envolventes melhorando assim a tomada de decisões (BACCHETTI et al., 2010).

3 A MODELAGEM MULTICRITÉRIO

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

O estudo tem como objetivo a análise das estratégias de manutenção em uma empresa fabricante de componentes ferroviários, com mais de 70 anos de atividades, é a principal referência latino-americana no desenvolvimento e fabricação de rodas de aço, fundidos ferroviários para truques sistemas de choque e tração, tais como extremidades fundidas de viga central, engates tipo E ¹ e F ², braçadeiras fixas e rotativas, aparelhos de choque e tração, hastes de ligação, cruzetas, colares, espelhos, além de rodas ferroviárias com tecnologia de aço microligado. São componentes robustos e com alto desempenho operacional, de fácil manutenção e adequados às altas solicitações e forças de movimentação dos trens atuais, mais pesados e longos.

A empresa está situada no sudeste do Brasil, instalada numa área total de 200 mil metros quadrados, dos quais, 40 mil construídos. Além dos componentes ferroviários, tem também possui capacidade para produzir peças de dez quilos a seis toneladas, em aço carbono e baixa liga. Fornece para os setores de mineração, máquinas e equipamentos para construção civil e sucroalcooleiro, tanto no mercado nacional quanto internacional.

Os gestores de manutenção não estão satisfeitos com a performance das atividades e desejam melhorar o rendimento do programa sem aumentar o valor investido. Foi constituído um comitê com três especialistas para avaliar os pontos cruciais desta gestão da manutenção: um Supervisor de Instalações e Manutenção, com diploma de Engenheiro Mecânico, 16 anos de experiência na planta e mais 20 anos em outra empresa; um Supervisor de Manutenção com diploma de Tecnólogo, quatro anos de experiência na planta e 33 anos de experiência em outras empresas e um Engenheiro de Manutenção, com diploma de Engenheiro Mecânico, com três anos de experiência em manutenção industrial, gestão de ativos e problemas de decisão multicritério. Apesar das diferentes idades, experiências e cargos, suas opiniões foram igualmente consideradas, uma vez que todos estavam envolvidos no gerenciamento de manutenção. Este grupo chegou a um consenso de dois pontos de extrema importância para uma boa gestão da manutenção: a seleção dos critérios para manutenção e a gestão das peças sobressalentes.

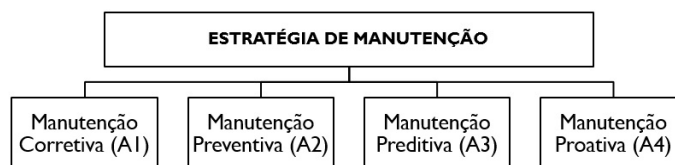
Após esta definição, a etapa seguinte é elaborar uma lista das estratégias de manutenção mais relevantes na empresa e os critérios para justificar a sua seleção. De forma análoga, também é elaborado uma lista para a gestão de peças sobressalentes e seus critérios de seleção. Assim, para as estratégias de manutenção, com base no senso comum do comitê e de forma análoga ao que Kardec e Nascif (2012) utilizou, as quatro políticas de manutenção foram selecionadas para avaliação: manutenção corretiva (A1), manutenção preventiva (A2), manutenção preditiva (A3) e manutenção proativa (A4).

¹ Engates do tipo E são comumente aplicados em vagões de carga geral, pois este engate não possui travadores laterais, sendo recomendado pela liberdade de movimentação vertical. Neste modelo de engate, o fundo da haste do engate é reto, não permitindo movimentos laterais.

² Engates do tipo F são utilizados em longos pesados e lentos trens tipo unitário, onde a estabilidade é fundamental para uma boa operação ferroviária. Através de seu travamento lateral não é permitido o movimento vertical entre as cabeças aumentando a proteção contra desa-coplamentos indesejáveis e a consequente paralisação dos trens. Embora mais segura, esta opção irá exigir uma folga maior entre o topo do espelho e a cauda do engate.

Com isso, a estrutura hierárquica do processo é ilustrado na Figura 8:

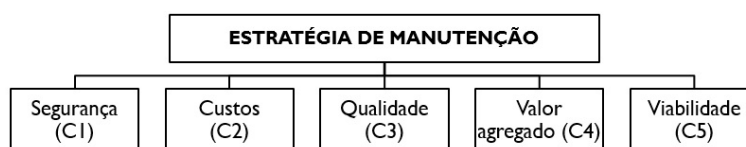
Figura 8 – Estratégias de manutenção selecionadas.



Fonte: Adaptado de Kardec; Nascif (2012).

Assim, as estratégias de manutenção são selecionadas de acordo com as metas e objetivos organizacionais da manutenção para diferentes equipamentos. E na maioria dos casos, os critérios de avaliação podem ser divididos em cinco casos, conforme Figura 9:

Figura 9 – Critérios de avaliação.



Fonte: Adaptado de Kardec; Nascif (2012).

A Segurança (C1) é o estado de estar "seguro". Para a otimização das estratégias de manutenção, representam as condições de evitar resultados indesejados, como falhas, erros, acidentes ou outros eventos. E também se refere à possibilidade de controlar as ameaças conhecidas a um nível aceitável. Entre os fatores relevantes de segurança estão a Segurança de Pessoal, Segurança de Instalações e Segurança Ambiental (GE et al., 2017).

O Custo (C2), mais generalizando no campo da economia, é uma métrica que se soma como resultado de um processo ou como diferencial para o resultado de uma decisão (O'SULLIVAN e SHEFFRIN, 2007). No campo da manutenção, os fatores relevantes de custo são Custo de *Hardware*, Custo de *Software* e Custo de Treinamento de Pessoal (GE et al., 2017).

A Qualidade (C3), em uma gestão da manutenção adequada, traduz-se em uma melhor qualidade de produção e redução de custos, enquanto uma má gestão de manutenção dos equipamentos leva-os à avaria, logo terá de investir no seu arranjo e talvez na sua substituição, traduzindo-se assim num custo elevado e pontual, podendo afetar também a produção. No que toca à produção, uma má gestão da manutenção pode levar à perda de qualidade do produto e à paradas de produção (TSUCHIYA, 1996).

O Valor agregado (C4) na área econômica, é a diferença entre o preço final e inicial para produzir um determinado produto. Na área da manutenção, valor agregado significa todos os benefícios e os retornos das atividades de manutenção. Geralmente, quanto maior o valor agregado, mais retorno será obtido com uma maior efetividade de manutenção e com menor entrada de serviços ou produtos. Os fatores mais relevantes são os inventários de peças sobressalentes, a perda da produção e identificação de falhas (GE et al., 2017).

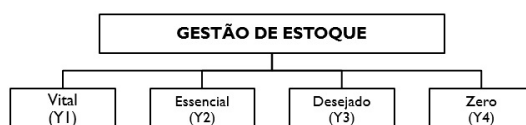
A Viabilidade (C5) é o critério aplicado para avaliar se a estratégia de manutenção é adequada para o sistema. De acordo com os diferentes requisitos de trabalhos e técnicas para estratégias de manutenção, os critérios de viabilidade podem ser divididos em dois principais fatores de avaliação relevantes: a

preferência dos trabalhadores (*acceptance by labours*) e a confiabilidade técnica (*technique reliability*) (GE et al., 2017). Na primeira, os especialistas em manutenção tendem a optar por estratégias de manutenção mais fáceis de implementar e entender e no segundo caso, devido ao seu caráter experimental, a manutenção baseada na condição e a manutenção preditiva podem ser inaplicáveis para algumas instalações.

Para a gestão das peças sobressalentes, o mesmo comitê chegou a um consenso de que a classificação proposta por Botter e Fortuin (2000) em VED (Vital, Essencial, Desejável), que é um método qualitativo baseado no conhecimento do especialista em manutenção, onde utiliza-se de julgamentos ou em pontuação. Também foi sugerido adicionar a esta classificação o caso de peças de baixo giro (entre uma e 300 unidades por ano) e baixíssimo giro (menos de uma unidade por ano), que são de difícil previsibilidade, com tempo de ressurgimento mais elevado, maiores exigências de nível de serviço e maior custo de aquisição. Outro item importante é o impacto causado pela falha desses itens onde, na maioria das vezes, provoca a parada do equipamentos ou de processos relevantes para a empresa. Neste caso, Wanke (2011) sugere que deve ser decidido se é mais econômico ter zero ou apenas um item de reposição em estoque.

Assim a classificação para a gestão das peças sobressalentes é ilustrada na Figura 10.

Figura 10 – Classificação da gestão de estoque.



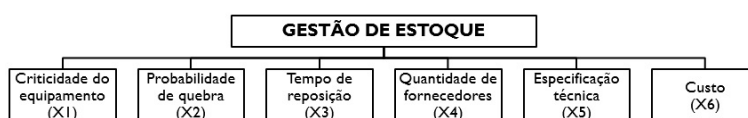
Fonte: Adaptado de Botter; Fortuin (2000).

Para Botter e Fortuin (2000), os itens considerados Vitais (Y1) são aqueles em que há perdas graves e tempo de inatividade podem ser esperados devido à indisponibilidade. Os itens considerados Essenciais (Y2) são aqueles em que perdas médias e desempenho reduzido podem ser esperados devido à indisponibilidade da peça de reposição. Os itens denominados Desejáveis (Y3) são aqueles que pequenas perdas, sem efeito no desempenho devido à indisponibilidade da peça de reposição e os itens denominados Zero (Y4) são aquelas peças não geram perdas e não afeta o desempenho.

Apesar de aparente simplicidade, a estruturação pode ser uma tarefa difícil, pois sua implementação pode sofrer julgamentos subjetivos dos usuários. O modelo de análise de VED é fácil de implementar na realidade, pois a classificação é baseada na opinião de especialistas, mas parece sofrer de subjetividade até certo ponto (BACCHETTI; SACCANI, 2012).

Fazendo a mesma avaliação para a gestão de peças sobressalentes e utilizando o modelo de Molenaers et al. (2012), o comitê selecionou seis (6) critérios de avaliação, conforme Figura 11:

Figura 11 – Gestão de peças sobressalentes.



Fonte: Adaptado de Molenaers et al. (2012).

A criticidade do equipamento (X1), determinada como uma combinação de atributos de risco e flutuação da demanda, indica a importância dos itens em estoque em termos de etapas de fabricação pendentes e projetadas (FLORES; OLSON; DORAI, 1992). Existem muitos tipos de riscos que podem resultar da cadeia de suprimentos ou de processos de produção semelhantes. Embora o termo "risco" seja vago e muitas vezes mal definido, é um termo usado com frequência tanto na linguagem diária quanto nas terminologias da cadeia de fornecimento (HECKMANN; COMES; NICKEL, 2015).

A probabilidade de quebra ou falha do item (X2) indica que quanto menor a taxa de falha de um componente, menor a necessidade de peças sobressalentes em estoque, de forma que é possível reduzir a necessidade de sobressalentes aumentando a confiabilidade da peça (WU; HSU, 2008). A confiabilidade de uma peça é muito dependente da qualidade de seu projeto e fabricação (KILPI; VEPSÄLÄINEN, 2004).

O tempo de reposição ou *lead time* (X3) é um critério importante para a classificação das peças sobressalentes pois a queda ou parada de produção por indisponibilidade do sobressalente devido a irregularidades de fornecimento é grave. O tempo de entrega de um sobressalente refere-se ao tempo entre o pedido do sobressalente e o tempo de fornecimento das peças sobressalentes. O *lead time* pode ser dividido em interno e externo, onde o interno é o tempo necessário para preparar o documento de requisição, a seleção de fornecedores e a colocação dos pedidos de compra para eles. Nesse caso, existe a necessidade de um sistema eficiente de gerenciamento de aquisições para reduzir o prazo de entrega interno. Por outro lado, o externo é totalmente dependente dos fornecedores e neste caso, deve-se ter um melhor método de seleção de fornecedores, revisão de desempenho de fornecedores, auditoria periódica e coordenação com fornecedores para reduzir o *lead time* externo. Além disso, a duração do *lead time* e sua variabilidade poderiam ser importantes para manter uma oferta adequada de um item sem custos excessivos (FLORES; OLSON; DORAI, 1992).

O número de fornecedores potenciais (X4), pois quando uma peça sobressalente é prontamente disponível através de vários fornecedores, a dificuldade em gerenciar o estoque dessa peça é baixa (ZENG; WANG; HE, 2012). No caso de compartilhamento de estoques, quanto mais empresas compartilham estoques, maior a quantidade de peças passíveis de compartilhamento (BRAGLIA; FROSOLINI, 2014).

A disponibilidade de especificações técnicas (X5) de um item é outra característica de controle específico para peças sobressalente de manutenção. Existem os itens comumente chamados de *standards*, ou padrão, que são extensamente usados por muitos usuários e consequentemente também prontamente disponíveis através de vários fornecedores. Para itens padronizados a disponibilidade é normalmente boa, e dessa forma existem estoques em diferentes fornecedores dentro da cadeia de suprimento e como os volumes são altos oferecem economias de escala na compra. Já para os itens de fabricação específica para determinado usuário, acontece o oposto: fornecedores estão pouco dispostos a manter estoques destes itens devido ao baixo volume, e a responsabilidade de disponibilidade e de controle resta ao próprio usuário (DONADEL, 2012).

O custo ou valor (X6) de uma peça sobressalente de manutenção é também uma característica de controle comum a todos os materiais, e um alto valor faz da geração de estoques uma solução não atraente para qualquer parte na cadeia logística. Altos valores também forçam as diferentes partes da

cadeia a buscar diferentes soluções em detrimento a manutenção de peças em estoque. Porém, se não for uma questão de um item do tipo *make-to-order* ou produção sob encomenda, estoques deveriam ser mantidos. Por outro lado, com itens de preços baixos, os arranjos de reabastecimento têm que ser eficientes de forma que os custos administrativos não aumentem desproporcionalmente ao valor dos itens mantidos em estoque. Em geral, o alto valor de um item de estoque favorece a postergação da compra destes materiais na cadeia de suprimentos (DONADEL, 2012).

3.2 MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO (MCDM)

A tomada de decisão por múltiplos critérios ou *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM), é uma sub-disciplina da pesquisa operacional que considera explicitamente vários critérios nos ambientes de tomada de decisão. O MCDM está preocupado com a teoria e a metodologia para tratar os problemas complexos encontrados nos negócios, na engenharia e em outras áreas da atividade humana. Um problema complexo é caracterizado por critérios ou objetivos incomensuráveis e conflitantes, como custo, desempenho, confiabilidade, segurança, produtividade e acessibilidade (ACHILLAS et al., 2013). Existem diferentes classificações de problemas e métodos do MCDM, sendo que usualmente são classificados como problemas de avaliação multicritério e problemas de projeto multicritério (TRANTAPHYLLOU, 2013).

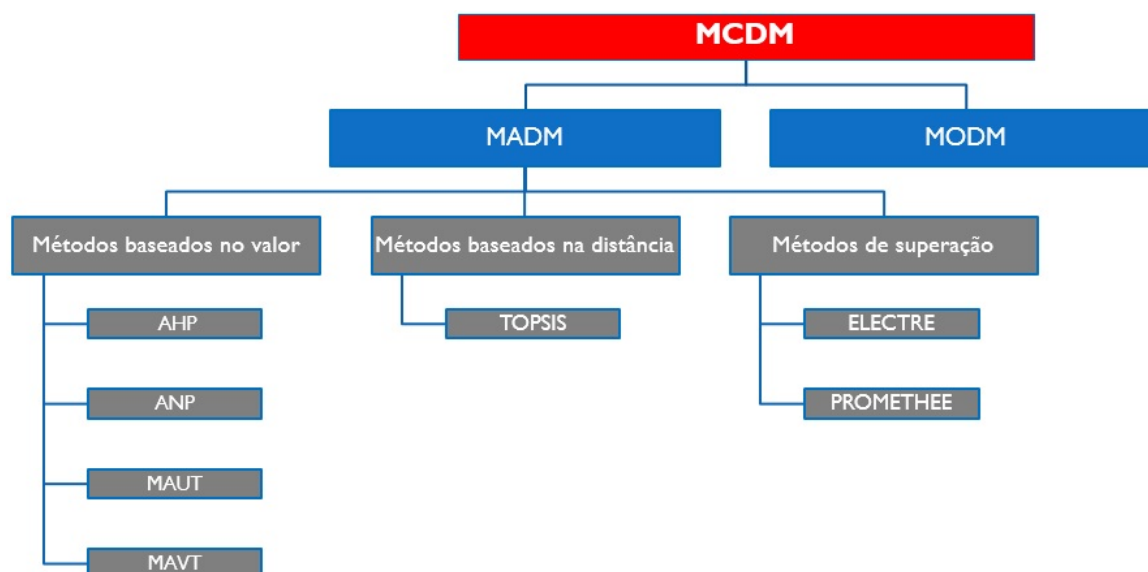
A primeira classe também é conhecida como tomada de decisão com vários atributos ou *Multi-Attribute Decision Making* (MADM), que consiste em um número finito de alternativas conhecidas no início do processo de tomada de decisão, e cada alternativa é representada por seu desempenho em vários critérios (MARDANI et al., 2016). A segunda classe também é conhecida como tomada de decisão multiobjetivo ou *Multi-Objective Decision Making* (MODM), onde a solução pode ser encontrada resolvendo um modelo matemático (YU; YANG; TANG, 2016). O MCDM usa uma rigorosa formulação matemática que apóia os tomadores de decisão durante o processo iterativo de tomada de decisão (EGILMEZ; GUMUS; KUCUKVAR, 2015). O vantagem do MCDM é que ele pode lidar com critérios múltiplos e conflitantes, com vários objetivos e com vários atributos, permitindo resolver uma ampla gama de problemas complexos encontrados em vários campos de negócios e engenharia (ACHILLAS et al., 2013). Esta representação pode ser ilustrada na Figura 12.

No MADM, o tomador de decisões atribui preferências por determinada alternativa e no final é gerada uma classificação das alternativas, dado um score, baseada no desempenho de cada solução em cada critério. Esta abordagem refere-se ao pensamento da Escola Americana (WANG; TRANTAPHYLLOU, 2008). Os critérios no MADM e MODM são expressos por atributos e funções objetivas, respectivamente. O status, desempenho ou condição de um critério, por sua vez, é avaliado por indicadores quantitativos ou qualitativos; isto é, os indicadores definem as informações usadas para avaliar um critério (POKORNY; ADAMS, 2003).

Ainda tendo o foco nos métodos de tomada de decisão multicritério, o MADM pode ser dividido em três grupos: os Métodos baseados em valor (*Value-based methods*), os Métodos de superação (*Outranking methods*) e os Métodos baseados na distância (*Distance-based methods*) (COELHO; LANGE; COELHO, 2017).

Nos métodos baseados em valores, é possível incluir a Teoria da utilidade de atributos múltiplos ou

Figura 12 – Representação da classificação do MCDM.



Fonte: Adaptado de Coelho; Lange; Coelho (2017).

Multi-attribute Utility Theory (MAUT), a Teoria dos valores de atributos múltiplos ou *Multi-attribute Value Theory* (MAVT) (KEENEY; RAIFFA, 1979), o Processo de hierarquia analítica ou *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (SAATY, 1977) e sua variante, chamada de Processo de rede analítica ou *Analytic Network Process* (ANP) (SAATY, 1996).

O MAVT e o MAUT, também conhecidos como abordagens baseadas em agregação de desempenho, são os métodos MCDM mais amplamente utilizados (RIABACKE; DANIELSON; EKENBERG, 2012). No MAVT, funções de valor são usadas para representar o nível de satisfação de uma alternativa em relação a um critério e o desempenho geral de uma alternativa é determinado pela agregação das funções de valor de cada critério em um único índice. A principal diferença entre MAVT e MAUT é que este último considera explicitamente a incerteza utilizando funções utilitárias em vez de funções de valor. Embora o AHP também pertença ao mesmo grupo que MAVT e MAUT, ele se baseia em diferentes suposições; essa abordagem avalia alternativas usando comparações aos pares em uma estrutura hierárquica multinível. Uma das principais vantagens do AHP é que ele calcula o índice de inconsistência, que avalia o nível de contradições de julgamento durante a comparação pareada (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004). A sua variante, o ANP, é uma generalização do AHP com a vantagem de permitir considerar as inter-relações entre níveis de decisão, critérios e alternativas (COELHO; LANGE; COELHO, 2017).

Os métodos baseados na distância possuem uma abordagem baseada na comparação do desempenho alternativo, calculando a distância da alternativa com a pior ou a melhor (melhor) solução. O método mais comumente usados neste campo é a Técnica para Preferência de Ordem por Similaridade ou *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), projetada por HWANG; YOON (1981). Neste método compara um conjunto de alternativas, identificando pesos para cada dimensão, normalizando as pontuações em cada dimensão e calculando a distância entre cada alternativa e a alternativa ideal (melhor em cada dimensão) e a alternativa ideal negativa (pior) nas dimensões ponderadas, usando uma das várias medidas possíveis de distância (por exemplo, distância euclidiana).

Finalmente, a razão entre a distância (separação) do ideal negativo e a soma da distância da alternativa ideal e da alternativa ideal negativa é calculada. Essa proporção é usada para calcular as alternativas. Os benefícios do TOPSIS incluem os fatos de que os únicos julgamentos necessários são pesos, enquanto as distâncias relativas dependem dos pesos e da variedade de alternativas em si, e a relação não linear entre pontuações de dimensão única e proporções de distância produz trocas mais suaves (HUANG; KEISLER; LINKOV, 2011).

Os métodos de superação, também conhecidos como abordagens baseadas em agregação de preferência, envolvem métodos baseados em comparações entre pares de opções para verificar se uma alternativa é pelo menos tão boa quanto outra (CINELLI; COLES; KIRWAN, 2014). Dois métodos comuns desse grupo são a Organização de Classificação de Preferência e Método para Avaliação de Enriquecimento ou *Preference Ranking Organization and Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE) (BRANS; VINCKE, 1985) e a Eliminação e Realidade Expressa de Escolha ou *Elimination and Choice Expressing Reality* (ELECTRE) (ROY, 1990). O PROMETHEE inclui três etapas principais: Definir funções de preferência para cada critério; estabelecer índices de preferência multicritério e fluxos de preferência; e alternativas de classificação (ANANDA; HERATH, 2009). O PROMETHEE I fornece uma classificação parcial, enquanto o PROMETHEE II permite uma classificação completa. Em relação à família de métodos ELECTRE, essas abordagens usam comparações aos pares para determinar índices de concordância e discordância. O primeiro avalia se uma alternativa é pelo menos tão boa quanto a outra, enquanto o segundo verifica se o desempenho de uma alternativa em um critério é pior que um limite aceitável (DOUMPOS; ZOPOUNIDIS, 2014). Este método possui várias variantes, incluindo ELECTRE I, II, III, IV e V.

Na vida real, os problemas de decisão são extremamente complexos; os seres humanos geralmente não conseguem fazer uma boa previsão para problemas quantitativos, ao contrário de problemas qualitativos, onde podem fazer suposições com maior precisão. E devido às expressões imprecisas, uma abordagem *fuzzy* é comumente usada em problemas de decisão. Modelos linguísticos *fuzzy* permitem a tradução de expressões verbais em numéricas. Assim, ao lidar quantitativamente com a imprecisão na expressão da importância de cada critério, são utilizados alguns métodos de múltiplos critérios baseados em relações *fuzzy* (GÜNGÖR; SERHADLIOĞLU; KESEN, 2009).

3.3 LÓGICA FUZZY

A lógica *Fuzzy* foi introduzida e aplicada pela primeira vez por Zadeh (1965) e evoluiu como uma ferramenta robusta e eficaz para lidar com a imprecisão, subjetividade ou incerteza nos dados, ganhando muita importância em aplicações práticas como controle de processos, flexibilização de sistemas de manufatura, automação flexível, MCDM, etc. Esta lógica é um superconjunto da lógica convencional (lógica aristotélica de dois valores) que foi estendida para lidar com o conceito de “verdade parcial” em contraste com a lógica clássica, que é equipada apenas para lidar com “totalmente verdadeiro” e “totalmente falso”. Em situações difíceis, a lógica *Fuzzy* visa fornecer um conjunto de conceitos e técnicas para lidar com modos de raciocínio que são aproximados e não precisos (KAPOOR; TAK, 2005).

Em muitos problemas, a incerteza e a imprecisão se devem a falta de dados. Essa teoria é

particularmente aplicável nos casos em que os problemas são complexos demais para definir com precisão, mas são facilmente controláveis e operáveis com a inferência humana, por meio do auxílio da experiência adquirida com o tempo e de conhecimentos inerentes (CHAN; PRAKASH, 2012).

3.3.1 Teoria dos conjuntos *Fuzzy*

Lotfi A. Zadeh demonstrou um método extraordinário para lidar com situações que envolvem os termos linguísticos como “aproximadamente”, “em torno de” ou “baixo”. Zadeh chamou esses conjuntos de “Fuzzy”; e os definiu como “... aqueles conjuntos que possuem graus contínuos de pertinência variando entre zero e um.” (ZADEH, 1965).

Curiosamente, relaxando a restrição de pertinência para qualquer objeto - do conjunto de dois elementos $\{0, 1\}$ no caso de conjuntos "Crisp"; a qualquer valor do intervalo unitário $[0,1]$ em Conjuntos *Fuzzy* - nos fornece um meio eficaz de modelar situações, que são conhecidas aproximadamente e possuem uma indefinição inerente. Esta generalização da estrutura axiomática da Teoria dos Conjuntos Convencionais nos fornece uma teoria paralela e infinitamente mais poderosa chamada "Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*"(KAPOOR; TAK, 2005).

3.3.2 Números *Fuzzy*

É um esforço recente dos matemáticos expressar números de maneira aproximada e realizar cálculos usando a Aritmética Difusa (*Fuzzy Arithmetic*). O número *fuzzy*, entende-se um número que é "um subconjunto *fuzzy* especial de números reais". (DUBOIS; PRADE, 1980).

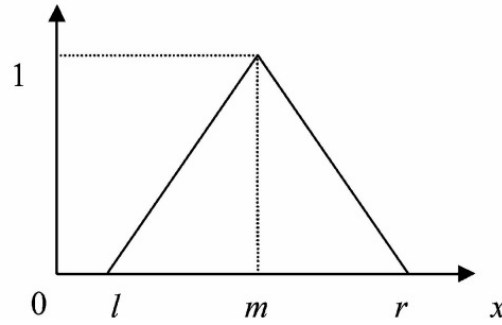
Ainda Dubois e Prade (1980) afirmam que o número *fuzzy* $\tilde{A}$ é um conjunto *fuzzy* e sua função de pertinência é $\mu_{\tilde{A}}(x): R \rightarrow [0,1]$, onde x representa as estratégias e é validada com as seguintes características:

1. $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é um mapeamento contínuo de R para o intervalo fechado entre 0 e 1;
2. $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é um subconjunto *fuzzy* convexo; e
3. $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é a normalização de um subconjunto *fuzzy*, o que significa que existe um número x_0 que torna $\mu_{\tilde{A}}(x_0) = 1$.

Como os números *fuzzy* mais comuns são os triangulares e os trapezoidais, os graus de pertinência formam funções com equações simples. Chang (1996) diz que um Número *Fuzzy* $\tilde{A}$ em R é definido como um Número *Fuzzy* Triangular (l, m, r) se sua função de pertinência é dada pela Equação 1 e representado graficamente na Figura 13.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} (x - l)/(m - l) & \text{para } m \leq x \leq r \\ (r - x)/(r - m) & \text{para } l \leq x \leq m \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (1)$$

Figura 13 – Diagrama da função de pertinência de um número *fuzzy* triangular.



Fonte: Adaptado de Chang (1996).

De acordo com as características dos números *Fuzzy* triangulares e o princípio de extensão de Zadeh (1965), as leis operacionais dos números *Fuzzy* triangulares, $A = (l_1, m_1, r_1)$ e $B = (l_2, m_2, r_2)$ são os seguintes:

$$\text{Adição : } (l_1, m_1, r_1) \oplus (l_2, m_2, r_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, r_1 + r_2) \quad (2)$$

$$\text{Subtração : } (l_1, m_1, r_1) \ominus (l_2, m_2, r_2) = (l_1 - r_2, m_1 - m_2, r_1 - l_2) \quad (3)$$

$$\text{Multiplicação de 2 números fuzzy : } (l_1, m_1, r_1) \otimes (l_2, m_2, r_2) = (l_{12}, m_{12}, r_{12}) \quad (4)$$

$$\text{Divisão : } (l_1, m_1, r_1) \oslash (l_2, m_2, r_2) = (l_1/r_2, m_1/m_2, r_1/l_2) \quad (5)$$

3.3.3 Variáveis linguísticas *Fuzzy*

Quando é considerado as variáveis linguísticas, existem muitas situações repletas de incertezas e dificuldades em se quantificar. Normalmente é encontrado dois problemas distintos: o primeiro trata-se da ambiguidade que envolve a variável linguística em questão, que é melhor descrita pela falta de informações sobre a própria variável. A segunda questão surge da maneira como a variável incerta é descrita (KIKUCHI, 2005).

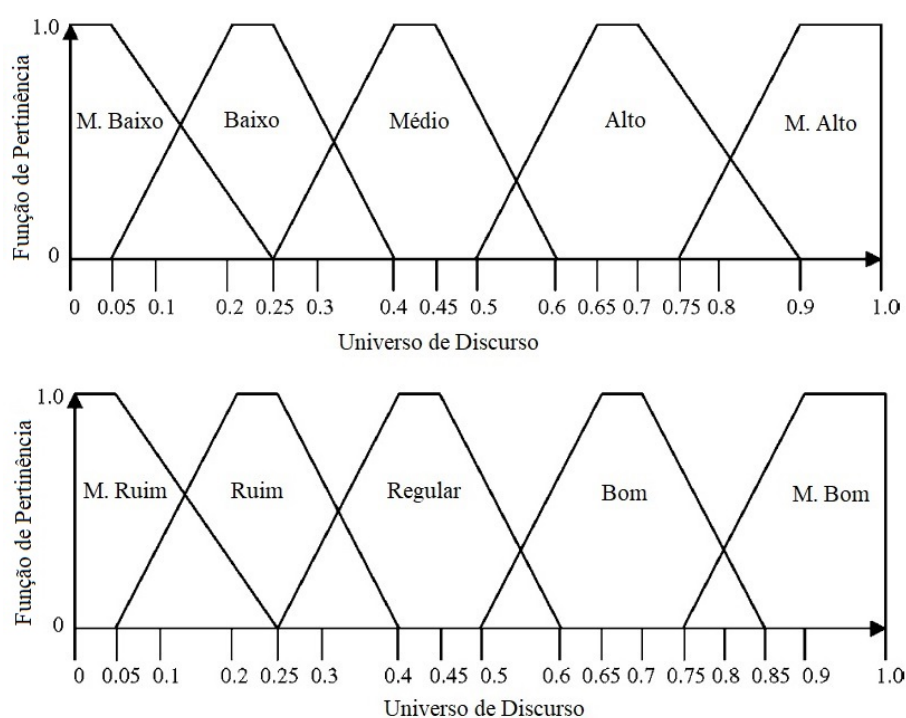
Variáveis linguísticas associam uma condição a uma variável *crisp*. Uma variável *crisp* é o tipo de variável usada na maioria dos programas de computador: um valor absoluto. Uma variável linguística, por outro lado, tem uma natureza proporcional: em todas as implementações de software de variáveis linguísticas, elas são representadas por valores fracionários dentro do intervalo de zero a um (BANKS, 2008).

Zadeh (1976) diz que a variável linguística *fuzzy* é entendida como “uma expressão em linguagem natural ou artificial” que representa uma variedade de valores. Por exemplo, idade é será uma variável linguística se seus valores não forem numéricos, como “jovem”, “não jovem”, “muito jovem”, “pouco jovem”, “bastante jovem”, “velho”, “muito velho”, etc., cada um dos quais é uma variável *fuzzy*.

As variáveis linguísticas *fuzzy* são comumente descritas como espalhadas pelo "universo do

discurso"por meio de sobreposições geométricas triangulares, trapezoidais ou quaisquer outras representações geométricas adequadas. Como exemplo, tem-se os valores linguísticos do conjunto de termos (muito baixo, baixo, médio, alto, muito alto) empregados para explicar a "preferência"da variável linguística *fuzzy* e os valores linguísticos do conjunto de termos (muito ruim, ruim, regular, bom, muito bom) são usados para explicar a "adequação", conforme Figura 14 (KAPOOR; TAK, 2005).

Figura 14 – Representação gráfica para o conjunto de termos da variável *fuzzy* linguística 'adequado' e 'preferência'.



Fonte: Adaptado de Kapoor; Tak (2005).

Ao contrário do uso de valores numéricos *crisp* (não *fuzzy*) para quantificação de opiniões subjetivas, o conceito de variáveis linguísticas fuzzy nos fornece um meio conveniente de fazer julgamentos subjetivos sobre situações complexas ou mal definidas (KAPOOR; TAK, 2005).

3.4 ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

O AHP foi nomeado por causa do uso de hierarquias para apresentar decisões multicritérios (SAATY, 1977). Este método permite aos tomadores de decisões estruturar um problema complexo sob a forma de uma hierarquia simples e avaliar grandes números de fatores quantitativos e qualitativos de forma sistemática em um ambiente com múltiplos critérios em conflito (CHENG; YANG; HWANG, 1999).

Saaty (1990) observou que, apesar das diferenças entre os estímulos seguirem uma escala geométrica, a percepção destes pelo indivíduo obedece a uma escala linear. Como em todo problema de decisão multicritério, a estruturação de um problema no método AHP começa com a definição de um objetivo global ou final desejado. Assim, Saaty, Kearns e Rodin (2014), recomendam os seguintes passos para a implementação da técnica AHP:

1. Definir o problema e o que se procura saber. Descobrir suposições e preconceitos refletidos na definição do problema; revisar a definição do problema se estas não forem viáveis. Identificar as partes afetadas; verificar como o problema foi definido. Considerar os modos de atuação do AHP.
2. Estruturar a hierarquia a partir do topo - isto é, do objetivo geral aos fatores ou critérios do nível intermediário ao nível mais baixo (geralmente as alternativas consideradas). Verificar se os níveis são internamente consistentes e completos e se os relacionamentos entre os níveis são claros.
3. Construir uma matriz de comparação cobrindo o conjunto de elementos do nível mais baixo para cada elemento no nível imediatamente acima. Em hierarquias completas simples, todo elemento no nível inferior afeta todos os elementos no nível superior. Em outras hierarquias, os elementos de nível inferior afetam apenas certos elementos de nível superior, exigindo a construção de matrizes exclusivas.
4. Fazer os julgamentos para preencher as matrizes. Isso requer $n(n-1)/2$ julgamentos para cada matriz $n \times n$, sendo n o número de linhas e colunas. O analista (ou o grupo participante) julga se o elemento A domina o elemento B - Se sim, inserir o número na célula da linha de A com a coluna de B. A posição coluna A com linha B terá o valor recíproco. Assim prossegue-se o preenchimento da matriz. Os valores inseridos são aqueles da escala de comparação, mostrados no Quadro 1.

Quadro 1 – Escala fundamental de preferências.

Valor	Definição	Explicação	Recíproco
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igual para o objetivo	1
3	Importância moderada	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra	1/3
5	Forte importância	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra	1/5
7	Muito forte a importância	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; pode ser demonstrada na prática	1/7
9	Extrema importância	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza	1/9
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições	1/2, 1/4, 1/6, 1/8

Fonte: Adaptado de Saaty (1990).

5. Calcular o Índice de Consistência (IC) para cada matriz, conforme Equação 6. Se não for satisfatório, refazer os julgamentos. Repetir as etapas (3) a (5) para todos os níveis da hierarquia.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

Saaty (1990) ainda diz que, para obter-se a consistência de uma matriz positiva recíproca (matriz criada no Passo 4), seu autovalor máximo deveria ser igual a n (dimensão da matriz). Para o caso de uma matriz consistente, é necessário $n - 1$ comparações paritárias já que, a partir dessas, as outras podem ser deduzidas logicamente. O autovetor dá a ordem de prioridade e o autovalor é a medida de consistência do julgamento, sendo que o método da análise hierárquica busca o autovalor máximo, λ_{max} , que pode ser calculado pela multiplicação da matriz de julgamentos A (Passo 4) pelo vetor coluna de prioridades computado w , seguido da divisão desse novo vetor encontrado, Aw , pelo primeiro vetor w , chegando-se ao valor de λ_{max} .

Cabe lembrar que $Aw = \lambda w$ e, que no método da análise hierárquica, $Aw = \lambda_{max}w$. E com isso é possível obter o valor para λ_{max} utilizando a Equação 7 abaixo:

$$\lambda_{max} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}{n} \quad (7)$$

Como regra geral, se o índice de consistência for menor do que 0.1, então há consistência para prosseguir com os cálculos do AHP. Se for maior do que 0.1 recomenda-se que julgamentos sejam refeitos (por exemplo, reescrevendo questões do questionário ou recategorizando elementos) até que a consistência aumente. Saaty (1990) sugere também o uso da Razão de Consistência (RC), conforme Equação 8, que considera o IC e o Índice Randômico (IR), que varia com o tamanho n da amostra.

$$Razão\ de\ Consistência = \frac{IC}{IR\ para\ n} \quad (8)$$

SAATY(1990) propõe uma tabela com os índices randômicos (IR) de matrizes de ordem 1 a 15 calculados em laboratório, conforme exibido no Quadro 2.

Quadro 2 – Índice randômico.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Fonte: Adaptado de Saaty (1990).

6. Analisar as matrizes para estabelecer as prioridades locais e globais, comparar as alternativas e selecionar a melhor opção.

3.5 FUZZY AHP

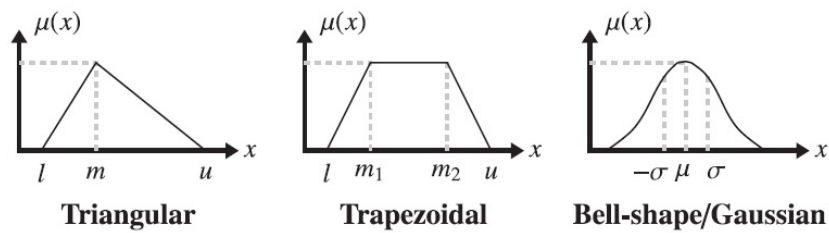
Diferente da teoria clássica dos conjuntos, a teoria dos conjuntos *fuzzy* permitem a avaliação gradual de elementos com relação a um conjunto (descrito usando uma função de pertinência). Os conjuntos *fuzzy* encontraram suas origens teóricas e aplicações na engenharia elétrica. Zadeh (1965) é o pai da teoria dos conjuntos *Fuzzy*, tendo feito a maior parte do trabalho matemático para formalizar e lidar com mais eficiência a imprecisão do raciocínio humano. Isso foi em 1971, quando ele publicou seu artigo, “*Quantitative fuzzy semantics*” (ZADEH, 1971).

Neste método, ao invés de atribuir valores determinísticos às comparações, são utilizados parâmetros linguísticos, aos quais serão atribuídos uma função de pertinência *fuzzy*. Dessa forma, as incertezas e ambiguidades do julgamento são consideradas. Os demais passos seguem a lógica do método AHP tradicional (ZADEH, 1965).

Além disso, a cada etapa da decisão é adicionada uma medida de imprecisão do julgamento feito pelo usuário nas comparações pareadas do modelo FAHP, a qual é representada pelo grau de fuzzificação (sigma). Este grau é atribuído a todas as comparações pareadas do processo decisório, possibilitando a incorporação da imprecisão ao processo de tomada de decisão (SIMÕES; SHAW, 2007).

Laarhoven e Pedrycz (1983) propuseram o primeiro método FAHP usando números *fuzzy* triangulares na matriz pareada de comparação. Nos anos posteriores, muitos outros métodos foram propostos, usando vários tipos de números *fuzzy*, como a função de pertinência trapezoidal (ONAR et al., 2016) ou a função de pertinência em forma de sino ou (*bell-shape*) - Gaussiana, que é menos usada (YUEN, 2012) como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Funções de pertinências tradicionais do FAHP.



Fonte: Adaptado de Kubler et al. (2016).

Uma matriz de comparação pareadas *fuzzy* (FPCM) pode ser expressa como na Equação 9, onde $\tilde{a}_{ij}$ ($i, j \in N$) deve refletir quantas vezes mais o critério i é preferido ao critério j com um certo nível de incerteza ou imprecisão. Enquanto em um conjunto clássico a_{ij} , um elemento pertence totalmente ou não a um ij , em um conjunto *fuzzy* $\tilde{a}_{ij}$, um elemento possui um grau de pertinência que pode ser desmarcado por $\mu(x) \rightarrow [0, 1]$. O núcleo de um conjunto *fuzzy* $\tilde{a}_{ij}$ é definido como o conjunto de elementos cujo grau de pertinência é igual a 1 (veja, por exemplo, $x = m$ no exemplo triangular de conjunto difuso na Fig. 14), e o suporte de $\tilde{a}_{ij}$ é definido como o conjunto de elementos cujo grau de pertinência é diferente de 0 (ou seja, $\forall x \in]l, u[$ no exemplo de conjunto *fuzzy* triangular e trapezoidal) (KUBLER et al., 2016).

$$\tilde{A}_{ij} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Vários métodos foram desenvolvidos para lidar com a derivação de peso dos FPCMs. Laarhoven e Pedrycz (1983) sugeriram um método *fuzzy* logarítmico de mínimos quadrados para obter pesos *fuzzy* triangulares de um FPCM. Buckley (1985) utilizou-se do método da média geométrica para calcular os pesos *fuzzy*. Chang (1996) propôs o método de análise de extensão, que deriva pesos nítidos de

um FPCM. Csutora e Buckley (2001) criaram o método Lambda-Max, que é a fuzzificação direta do método λ_{max} , enquanto Mikhailov (2003) desenvolveu o método Programação de preferências *fuzzy* ou *Fuzzy Preference Programming* (FPP).

Entre essas abordagens, o método de análise de extensão de Chang (1996) é talvez o mais popular e a principal razão é por causa da simplicidade da sua implementação, embora um número significativo de trabalhos de pesquisa tenha demonstrado que ele sofre de armadilhas teóricas (ZHü, 2014). As críticas apontam o fato de que os pesos determinados pelo método de análise não representam a importância relativa de critérios ou alternativas de decisão, o que pode levar a problemas como baixa robustez, prioridades não coerentes e perda de informações (KUBLER et al., 2016).

Wang et al. (2014) mostram um esboço do método de análise de extensão do AHP *fuzzy*, onde sejam $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ um conjunto de objetivos e $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ um objetivo definido. De acordo com a análise de extensão de Chang (1996), cada objeto é obtido e uma análise de extensão é realizada para cada objetivo, g_i e, portanto, podem ser obtidos os valores de análise de extensão para cada objeto, com os seguintes sinais conforme Equação 10:

$$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m, i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

onde todo $M_{g_i}^m$ ($j = 1, 2, \dots, m$) são números *fuzzy* triangulares cujos parâmetros são representados como (a, b, c) e representam o menor valor possível, o valor mais possível e o maior valor possível, respectivamente. As etapas para a análise de extensão são as seguintes:

Passo 1 - o valor da extensão *fuzzy* sintética com relação ao i -ésimo objetivo é definido conforme Equação 11:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \otimes [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j]^{-1} \quad (11)$$

Para obter $\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j$, é preciso realizar a operação de adição *fuzzy* de m extender a análise dos valores para uma matriz específica, conforme Equação 12:

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = (\sum_{j=1}^m a_j, \sum_{j=1}^m b_j, \sum_{j=1}^m c_j), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

E para obter $[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j]^{-1}$, executar a operação de adição *fuzzy* em $M_{g_i}^j$ ($j = 1, 2, \dots, m$) valores tais conforme Equação 13:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = (\sum_{i=1}^n a_i, \sum_{i=1}^n b_i, \sum_{i=1}^n c_i) \quad (13)$$

E depois calcule o inverso do vetor na Equação 14 tal que:

$$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j]^{-1} = (\frac{1}{\sum_{i=1}^n c_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n b_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_i}) \quad (14)$$

Passo 2 - o grau da possibilidade de $M_2 = (a_2, b_2, c_2) \geq M_1 = (a_1, b_1, c_1)$ é definido conforme

Equação 15:

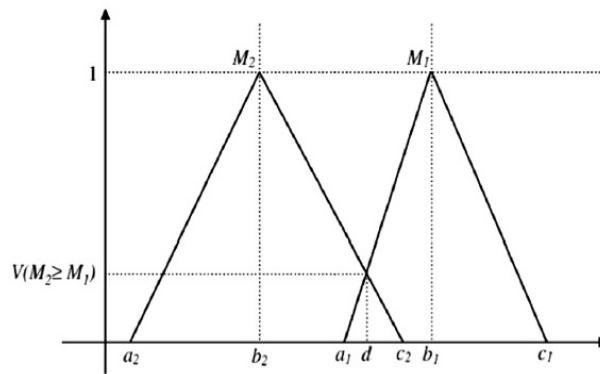
$$V(M_2 \geq M_1) = \text{Sup}_{y \geq x} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))] \quad (15)$$

O termo "Sup" na Equação 15 significa o valor supremo. Quando um par (x, y) existe, de modo que $x > y$, com x fuzzificado restrito a pertencer a M , seja maior que y com fuzzificado restrito a pertencer a M , o valor do vetor é igual ao valor supremo do valor mínimo entre μ_{M_1} e μ_{M_2} , sendo que o valor do vetor pode ser expresso de forma equivalente como segue:

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt}(M_2 \cap M_1) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1 & \text{se } b_2 \geq b_1 \\ 0 & \text{se } a_1 \geq c_2 \\ \frac{a_1 - c_2}{(b_2 - c_2) - (b_1 - a_1)}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (16)$$

Na Equação 16, o termo "hgt" significa a altura do ponto de interseção entre μ_{M_1} e μ_{M_2} , onde d é a ordenada do ponto de interseção mais alto entre μ_{M_1} e μ_{M_2} (como mostrado na Figura 16). Para comparar M_1 e M_2 , os valores de $V(M_1 \geq M_2)$ e $V(M_2 \geq M_1)$ são necessários.

Figura 16 – A intersecção entre M_1 e M_2 .



Fonte: Adaptado de Wang et al. (2014).

Passo 3 - o grau de possibilidade de um número *fuzzy* convexo ser maior que o k número *fuzzy* convexo M_i ($i = 1, 2, \dots, k$) é definido pelas Equações 17 e 18:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ e } (M \geq M_2) \text{ e } \dots \text{ e } (M \geq M_k)] \quad (17)$$

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = \min V(M \geq M_i), i = 1, 2, 3, \dots, k. \quad (18)$$

Assumindo que:

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \text{ para } k = 1, 2, \dots, n; k \neq i. \quad (19)$$

Então o vetor de peso é dado pela Equação 20:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (20)$$

Onde A_i ($i = 1, 2, \dots, n$) são n elementos, os vetores peso são os pesos de cada elemento sob um determinado critério.

Passo 4 - normalizando, o peso do vetor é dado pela Equação 21:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (21)$$

Onde W é um número não *fuzzy*. Para converter a escala linguística em uma escala *fuzzy*, a conversão *fuzzy* triangular é apresentada na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Escala de conversão *fuzzy* triangular.

Escala linguística	Escala <i>fuzzy</i> triangular	Escala <i>fuzzy</i> triangular recíproca
Igual	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Igualmente importante	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
Um pouco mais importante	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
Fortemente mais importante	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Muito fortemente mais importante	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
Absolutamente mais importante	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2014).

3.6 MULTI-ATTRIBUTE UTILITY THEORY (MAUT)

A Teoria da Utilidade Multiatributo, também referida por MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*), deriva-se da Teoria da Utilidade, que é um modelo matemático utilizado para representar a preferência do decisor pelas alternativas candidatas à resolução de um problema decisório. Este método permite ao tomador de decisão estruturar um problema complexo em forma de uma simples hierarquia e avalie subjetivamente um grande número de fatores, qualitativos e quantitativos, incluindo seus riscos e incertezas (MIN, 1994).

Os fundamentos do MAUT foram lançados por Churchman, Ackoff e Arnoff (1957), que primeiro trataram um problema de decisão de múltiplos critérios usando um método simples de ponderação aditiva. Foi desenvolvido ainda usando uma função de utilidade quasi-aditiva e multi-linear. Seu desenvolvimento inicial é atribuído a Fishburn (1978). Keeney e Raiffa (1979) dedicaram grande parte de seu trabalho ao MAUT e desde então, o método foi se desenvolvendo a ponto de elaborar metodologias para extrair as funções de utilidade e para agregar as funções de critério único a uma função de utilitário com vários atributos, e agora fornece um mecanismo formal para lidar com vários objetivos, fatores intangíveis, risco, dados qualitativos e efeitos de sequência temporal em avaliações ex ante, com base nas preferências do tomador de decisão (DILLON; PERRY, 1977).

O MAUT baseia-se em medir as preferências dos tomadores de decisão. Primeiramente, os impactos das alternativas de decisão são unificados em uma escala de intervalo de zero a um. Portanto, o uso do MAUT torna possível comparar dinheiro, por exemplo, com valores recreativos. Em seguida, as preferências dos decisores são processadas com certas técnicas de ponderação e, com base nesses pesos, as utilidades das alternativas de decisão são agregadas (MYLLYVIITA et al., 2013).

Para Rebai, Azaiez e Saidane (2016), o MAUT é um meio para tomar decisões efetivas. Ele fornece uma ferramenta aos decisores em um contexto multiobjetivo para expressarem suas preferências entre alternativas relacionadas a cada aspecto relacionado. Além disso, o MAUT é um modelo compensatório

completo, onde integra sistematicamente vários critérios, às vezes conflitantes, na avaliação. Ele também incorpora via preferências da função de utilidade multiatributo as incertezas sobre todos os atributos, fazendo com que as trocas entre os atributos sejam explicitadas pelas constantes de escala.

De acordo com Adalı e Işık (2017), a abordagem MAUT pode ser resumida nas seguintes etapas:

1. Determinar os critérios, subcritérios e alternativas do problema de decisão.
2. Calcular os pesos dos critérios com um dos métodos de ponderação.
3. A matriz de decisão X é formada conforme Equação 22. Ela mostra o desempenho de diferentes alternativas com relação aos vários critérios.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (22)$$

onde $i = 1, 2, 3, \dots, m$, $j = 1, 2, 3, \dots, n$ e x_{ij} representa desempenho da i -enésima alternativa no j -ésimo critério.

4. A função utilidade para cada critério é avaliada. O valor de um (1) é atribuído ao nível mais alto de satisfação para um determinado critério. Por outro lado, o valor zero (0) é atribuído ao valor mais baixo. Valores intermediários podem ser calculados pelo procedimento de normalização (FREITAS et al., 2013). As Equações 23 e 24 são executados para os critérios benéficos e não benéficos, respectivamente:

$$u_j = (x_{ij}) = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (23)$$

$$u_j = (x_{ij}) = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (24)$$

onde $i = 1, 2, 3, \dots, m$, $j = 1, 2, 3, \dots, n$ e $u_j(x_{ij})$ são os valores de critérios normalizados determinados a partir das funções de utilidade de atributo único em escalas normalizadas.

5. Após avaliar a função de utilidade para cada critério, o utilitário integrado de cada alternativa é calculado. Função utilitária aditiva mostrada na Equação 25 é o modelo mais simples do MAUT. Nesse modelo, a utilidade combinada dos objetivos múltiplos é a soma das funções de utilidade única multiplicadas por uma constante de escala que reflete a importância de cada objetivo no contexto da decisão (KAILIPONI, 2010).

$$U(A_i) = \sum_{j=1}^n w_j u_j(x_{ij}) \quad (25)$$

onde $U(A_i)$ denota a utilidade da alternativa i , w_j denota o peso do critério j e $u_j(x_{ij})$ denota os valores dos critérios normalizados determinados a partir de funções de utilidade de atributo único em escalas normalizadas. Os tomadores de decisão devem considerar a alternativa com o maior valor de utilidade integrada (WANG et al., 2010).

Belton e Stewart (2002) dizem que, do ponto de vista técnico, a análise de sensibilidade é o exame objetivo do efeito na saída de um modelo de mudanças nos parâmetros de entrada. Confirmando que ela visa determinar quais parâmetros de entrada têm uma influência crítica na avaliação geral da função de utilidade multiatributo, ou seja, onde uma pequena alteração em um critério de peso ou na pontuação de uma alternativa pode afetar a ordem geral de preferências.

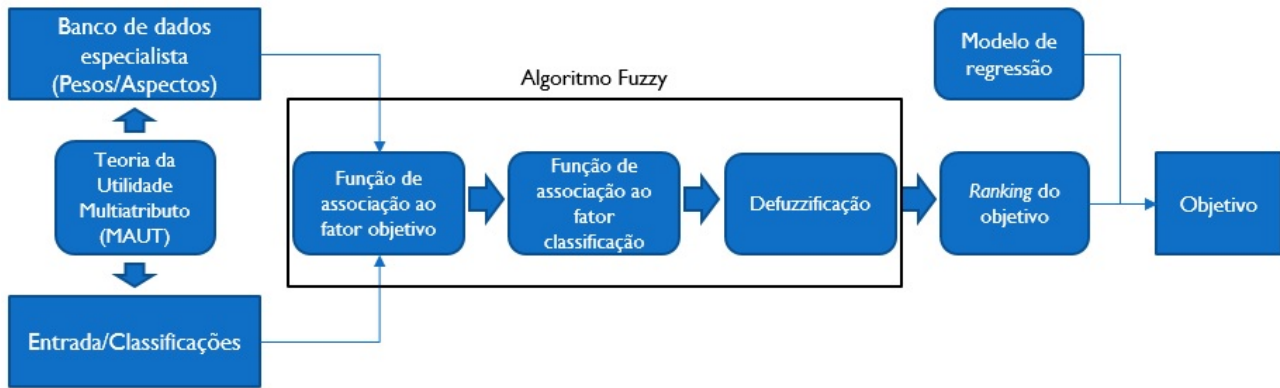
Bukhsh et al. (2019) afirmam que o MAUT tem sido amplamente utilizado em vários campos, por exemplo para projetos em planejamento de investimentos (PUJADAS et al., 2017), para assistência médica (SUN, 2016) e para desempenho e avaliação orçamentária de obras de água (ISMAEEL, 2016). Alguns estudos no contexto do gerenciamento de infraestrutura também são encontrados na literatura que se refere ao MAUT como base para modelagem matemática, para inspeção e manutenção (ALMEIDA; FERREIRA; CAVALCANTE, 2015), para bridge avaliação de sustentabilidade (DONG; FRANGOPOL; SABATINO, 2015), para tomada de decisão sobre investimentos em manutenção (ARIF; BAYRAKTAR; CHOWDHURY, 2016) e para otimização do nível da rede de pontes (FRANGOPOL; LIU, 2007). No entanto, a aplicação do MAUT para o planejamento de manutenção objetivo múltiplo em sistemas de infraestrutura de transporte, incorporando as preferências dos tomadores de decisão, não é totalmente explorada. A maioria dos estudos da literatura mencionou o MAUT como parte de uma estrutura maior e explora seus poucos conceitos relevantes. Para explorar o potencial do MAUT para o planejamento de manutenção no nível da rede, este documento tem como objetivo aplicar o MAUT à tomada de decisões do planejamento de manutenção, onde um gerente / tomador de infraestrutura precisa lidar com vários objetivos.

3.7 FUZZY MAUT

Na abordagem tradicional do MAUT, as variáveis de decisão são determinísticas e os valores da utilidade são nítidos, o que faz o método ser incapaz de lidar com problemas que possuem dados qualitativos e incertos. Na prática industrial, os profissionais e os especialistas geralmente descrevem objetos ou eventos com informações lingüísticas e incertas, como por exemplo, os tomadores de decisão podem usar um termo vago como "muito difícil", para descrever o grau de eficácia em um determinado sistema de medição de desempenho. Em outros casos, eles podem fornecer um intervalo de um determinado parâmetro para descrever um objeto e aplicando a teoria da utilidade à avaliação da sustentabilidade, os tomadores de decisão podem fornecer uma gama de valores de utilidade para um nível de indicador específico. Assim, é desejável usar a teoria dos conjuntos *fuzzy* para obter um resultado mais sensato. (EROL; SENCER; SARI, 2011). Esta teoria foi concebida por Zadeh (1965) para resolver a imprecisão e ambiguidade dos conhecimentos e julgamento humanos, fornecendo ferramentas matemáticas para resolver essas incertezas associadas ao pensamento e raciocínio humano, permitindo a associação crisp ao conjunto, em vez de uma associação parcial (KANNAN et al., 2013).

O processo completo do método *Fuzzy Multi-Attribute Utility Theory* (FMAUT) é mostrado na Figura 17. Um banco de dados é desenvolvido com o intuito de incorporar os conhecimentos e as opiniões de todos os funcionários relevantes ao processo. As classificações de entrada são convertidas em valores de utilidade com base em MAUT. O *ranking* do objetivo é obtido usando o algoritmo *fuzzy*, e sua meta final é obtida usando um modelo de regressão. (DONG, 2012).

Figura 17 – Passos do FMAUT para chegar ao objetivo final.



Fonte: Adaptado de Dong (2012).

No FMAUT, os valores w_i e $U_i(x_i)$ são números *fuzzy* e expressos por funções de pertinência em vez de números reais. Com isso, o resultado $U(X)$ é um valor *fuzzy* também expresso por funções de pertinência de ranqueamento, em vez de um valor geral de utilidade (TING et al., 1999).

As opiniões sobre os valores de utilidade podem variar de um especialista para outro e estes valores de utilidade também são vagos e confusos. Portanto, uma função de associação para cada nível de um atributo devem ser definida para refletir as opiniões dos especialistas sobre os valores de utilidade. Para uma função de pertinência triangular, os valores de utilidade mínimo e máximo para cada nível fornecidos pelos especialistas formam os dois pontos inferiores, e a média dos valores de utilidade formam o ponto superior. As operações da Equação 26 seguinte devem ser feitas para cada nível de um atributo (DONG, 2012).

$$\begin{cases} TL_{ij} = \min(U_{ijk}) \\ TM_{ij} = \sum_{k=1}^l U_{ijk}(l)^{-1} \\ TU_{ij} = \max(U_{ijk}) \end{cases} \quad (26)$$

Os graus de adesão para os valores de utilidade TL_{ij} e TU_{ij} são 0; a nota de adesão para o valor da utilidade TM_{ij} é igual a 1. Isso é baseado no pressuposto de que, entre os valores de utilidade fornecidos pelos especialistas, a média dos valores tem mais probabilidade de indicar o nível do recurso que o valor mínimo ou o valor máximo. As funções de pertinência para todos os níveis de recursos dos atributos com base na experiência de especialistas, são armazenadas no modelo. Para uma tese, se os níveis de cada atributo puderem ser identificados, as funções de pertinência correspondentes poderão ser recuperadas. Uma função de associação é estabelecida para cada atributo onde essas funções de associação são combinadas, tornando-se uma função de pertinência para chegar ao ranqueamento do objetivo (DONG, 2012).

Similar aos valores de utilidade, os pesos podem ser expressos na forma de função de pertinência devido à sua imprecisão. Os especialistas fornecem os pesos $(w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{il})$ para o atributo i , onde a função de pertinência do peso para o atributo i pode ser construída conforme Equação 27.

$$\begin{cases} WL_i = \min(w_{ik}) \\ WM_i = \sum_{k=1}^l w_{ik}(l)^{-1} \\ WU_i = \max(w_{ik}) \end{cases} \quad (27)$$

Assim, WL_i , WU_i são os dois pontos inferiores da função de pertinência com grau igual a 0 e WM_i é o ponto superior da função de pertinência com grau igual a 1. O resultado $U(X)$ é um valor *fuzzy* expresso pela função de pertinência do ranqueamento em vez de um valor geral de utilidade, como mostrado nas Equações 28 e 29.

$$\mu(U(X)) = \frac{\prod_{i=1}^X [W \cdot \mu(w_i \mu(U_i(x_i))) + 1] - 1}{W} \quad (28)$$

$$1 + W = \prod_{i=1}^X (1 + W \cdot w_i^{max}) \quad (29)$$

A função de adesão do ranqueamento descreve a relação entre a nota de associação e o valor geral da utilidade (ranqueamento objetivo). Para obter o ranqueamento quantitativamente, a função de associação do objetivo precisa ser defuzzificada. Existem numerosos métodos de defuzzificação na literatura (ROYCHOWDHURY; PEDRYCZ, 2001). Entretanto, as aplicações para esse processo geralmente baseiam-se nos métodos do centro de área, onde o centro da função de pertinência é considerado como parâmetro índice, e no método do centro de máximo, a média dos valores de utilidade mínimo e máximo é considerada como parâmetro índice esperado. Normalmente, os resultados dos dois métodos são muito próximos (DONG, 2012).

Ainda de acordo com Seo (1997), para se construir uma função FMAUT baseada em uma função de utilidade *fuzzy*, são necessárias algumas premissas:

- a) Os critérios *fuzzy* mutuamente independentes em sua preferência.
- b) A mútua independência na avaliação da probabilidade
- c) Uso do número *fuzzy* do tipo LR para representar um valor da função utilidade *fuzzy*.
- d) A articulação das permutas *fuzzy* de preferência entre atributos, onde os critérios *fuzzy* mutuamente independentes em preferências e possibilidades, com as permutas *fuzzy* entre cada par de atributos avaliados.
- e) A articulação da ordem de preferência *fuzzy* para os atributos selecionados é realizada com a ordem *fuzzy* fraca.

Baseando-se nas premissas mencionadas, um modelo para a contruição de um modelo FMAUT, combinando as teorias MAUT e conjuntos *fuzzy*, deve seguir os seguntes passos (EROL; SENCER; SARI, 2011):

- a) Identificar os valores *fuzzy* da utilidade intermediária para os critérios de benefício;
- b) Após o cálculo da normalização *fuzzy* da matriz de avaliação, o valor final da utilidade *fuzzy* é encontrado adicionando-se as utilidades de alternativas em diferentes critérios;
- c) Classifique a ordem de referência. Escolha uma alternativa com o máximo da utilidade *fuzzy* i como o melhor valor de classificação.

4 RESULTADOS

4.1 APLICAÇÃO DO AHP CLÁSSICO

Como citado no item 3.1, o comitê com três especialistas responsáveis pelas decisões da manutenção responderam ao questionário de preferências para escolha da melhor estratégia de manutenção. Na Tabela 4 pode ser observada a matriz de julgamentos pareada, realizada para os Critérios C1, C2, C3, C4 e C5 pelos três especialistas (E1, E2 e E3) baseada na Escala Fundamental de Preferências de Saaty (1990).

Tabela 4 – Julgamento dos critérios pelos especialistas.

E1	C1	C2	C3	C4	C5	E2	C1	C2	C3	C4	C5	E3	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	3	0.25	1	2	C1	1	5	0.33	0.20	3	C1	1	7	0.25	0.50	3
C2	0.33	1	0.33	0.20	1	C2	0.20	1	0.20	0.20	1	C2	0.14	1	0.20	0.14	2
C3	4	3	1	1	4	C3	3	5	1	1	6	C3	4	5	1	1	6
C4	1	5	1	1	2	C4	5	5	1	1	2	C4	2	7	1	1	3
C5	0.50	1	0.25	0.50	1	C5	0.33	1	0.17	0.50	1	C5	0.33	0.50	0.17	0.33	1

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 5 mostrada a seguir, apresenta as comparações pareadas sobre os critérios que passaram pelo julgamento dos especialistas em manutenção, agregados por sua média geométrica, junto com a soma, o valor do autovetor e a sua prioridade já em escala percentual, conforme Saaty e Peniwati (2013) sugerem.

Tabela 5 – Comparações dos critérios de estratégia para manutenção.

Critério	C1	C2	C3	C4	C5	Autovetor	Prioridade
C1	1	4.718	0.275	0.464	2.621	1.096	17.3%
C2	0.212	1	0.237	0.179	1.26	0.408	6.4%
C3	3.634	4.217	1	1	5.241	2.404	38.0%
C4	2.154	5.593	1	1	2.289	1.942	30.7%
C5	0.382	0.794	0.191	0.437	1	0.479	7.6%
SOMA	7.382	16.32	2.703	3.080	12.41		

Fonte: Autoria própria.

Assim, por meio do vetor soma S e do autovetor normalizado W , tem-se o autovalor λ_{max} , que é calculado de acordo com a matriz de multiplicação apresentada abaixo:

$$\lambda_{max} = [7.382; 16.32; 2.703; 3.08; 12.41] \cdot \begin{bmatrix} 1.096 \\ 0.408 \\ 2.404 \\ 1.942 \\ 0.479 \end{bmatrix} = 5.242$$

O índice de consistência (IC) que calcula a medida de coerência dos julgamentos, é calculado por meio da equação abaixo:

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} = \frac{(5.242 - 5)}{(5 - 1)} = 0.0605$$

Pode-se calcular a razão de consistência (RC) utilizando o índice randômico proposto por Saaty (1990) conforme equação abaixo:

$$RC = \frac{0.0605}{1.12} = 0.054$$

Como RC = 0.054, segundo Saaty e Peniwati (2013), a matriz de julgamento é considerada consistente e satisfaz a análise. Se o valor do RC fosse superior a 0.1, pode existir problemas de inconsistência nos julgamentos e o método AHP não deverá ser utilizado até que as comparações sejam revistas em busca de uma melhor consistência. Assim, o critério C1 apresenta resultado de 17.3%, o critério C2 apresenta resultado de 6.4%, o critério C3 apresenta resultado de 38.0%, o critério C4 apresenta resultado de 30.7% e o critério C5 apresenta resultado de 7.6%, ou seja, os critérios Qualidade (C3) e Valor Agregado (C4) têm a maior prioridade, o que é razoável no mercado altamente competitivo da indústria siderúrgica pesada.

O passo seguinte do método AHP é calcular o vetor decisão que irá indicar a estratégia mais adequada para se tomar a decisão. Este valor é o maior valor na coluna Global. Na Tabela 6, a matriz de decisão onde as prioridades foram obtidas a partir da comparação par a par das matrizes de preferência, utilizando os critérios (C1, C2, C3, C4, C5) com relação aos subcritérios (A1, A2, A3, A4). Como a taxa de consistência geral ficou abaixo do limite superior, os resultados da pesquisa são aceitáveis.

Tabela 6 – Prioridades locais e globais de estratégia para manutenção.

Estratégia	C1 (17.3%)	C2 (6.4%)	C3 (38.0%)	C4 (30.7%)	C5 (7.6%)	Global
Corretiva (A1)	38.3%	51.7%	45.7%	64.1%	36.1%	49.7%
Preventiva (A2)	46.4%	32.0%	19.3%	17.6%	14.8%	24.0%
Preditiva (A3)	7.9%	6.9%	20.3%	7.6%	30.2%	14.1%
Proativa (A4)	7.4%	9.3%	14.7%	10.7%	18.9%	12.2%
RC	0.086	0.011	0.011	0.092	0.061	

Fonte: Autoria própria.

Assim, a Manutenção Corretiva (A1) foi a de maior valor, com 49.7%. Em seguida vem a Manutenção Preventiva (A2) com 24.0%, Manutenção Preditiva (A3) com 14.1% e Manutenção Proativa (A4) com 12.2%. Estes valores refletem bem o panorama da estratégia de manutenção de uma empresa brasileira, pois segundo Xavier (2005) no Brasil, a manutenção é considerada de terceiro mundo por alguns motivos, tais como: alta taxa de retrabalho, falta de pessoal qualificado, convivência com problemas crônicos, falta de estoque, número elevado de serviços não previstos, histórico de manutenção inexistente ou não confiável, abuso de ajustes sem critérios, total falta de tempo para qualquer coisa, o excessivo número de manutenções corretivas, dentre outros. De acordo com o autor,

uma grande diferença entre o nosso país e outros que obtiveram excelentes resultados, refere-se ao fato que eles conhecem e fazem, enquanto aqui as pessoas conhecem, mas não é feito.

4.2 APLICAÇÃO DO AHP FUZZY

O mesmo comitê de especialistas foi convidado a fazer um processo de fuzzificação no julgamento das comparações. Assim, a comparação anterior foi assumida como um valor modal de um conjunto difuso triangular, com valores inferiores (*low*) e superiores (*high*) adicionados com sua revisão. A Tabela 7 apresenta a matriz média de comparações pareadas fuzzy dos critérios de julgamento dos especialistas.

Tabela 7 – Comparações fuzzificadas dos critérios de estratégia para manutenção.

Critério	C1	C2	C3	C4	C5
C1	(1, 1, 1)	(4.71, 4.72, 4.72)	(0.27, 0.29, 0.29)	(0.31, 0.31, 0.31)	(2.61, 2.62, 2.67)
C2	(0.21, 0.21, 0.21)	(1, 1, 1)	(0.24, 0.24, 0.24)	(0.18, 0.18, 0.19)	(1.57, 1.59, 1.59)
C3	(3.46, 3.47, 3.76)	(4.20, 4.22, 4.17)	(1, 1, 1)	(0.48, 0.48, 0.49)	(5.24, 5.24, 5.24)
C4	(3.25, 3.27, 3.27)	(5.26, 5.59, 5.59)	(2.04, 2.08, 2.10)	(1, 1, 1)	(2.28, 2.29, 2.30)
C5	(0.37, 0.38, 0.38)	(0.63, 0.63, 0.64)	(0.19, 0.19, 0.19)	(0.43, 0.44, 0.44)	(1, 1, 1)

Fonte: Autoria própria.

Por meio da Equação 11 foi encontrado as Medidas Sintéticas Fuzzy (S_i):

$S_1 = (0.203, 0.206, 0.209)$; $S_2 = (0.073, 0.074, 0.075)$; $S_3 = (0.328, 0.332, 0.341)$;

$S_4 = (0.316, 0.328, 0.332)$; $S_5 = (0.060, 0.061, 0.062)$

Comparando os valores das Medidas Sintéticas Fuzzy (S_i) encontrados foram comparadas entre si e utilizando as Equações 20 e 21, chega-se aos vetores W^T e W :

$$W^T = (0.206, 0.074, 0.334, 0.325, 0.061) \rightarrow W = (0.206, 0.074, 0.334, 0.325, 0.061)$$

Com isso, tem-se para os valores inferiores: $\lambda_{low} \approx 5.41$, $IC_{low} \approx 0.10$, $RC_{low} \approx 0.09$ e para os valores altos: $\lambda_{high} \approx 5.51$, $IC_{high} \approx 0.13$ e $RC_{high} \approx 0.1$. Os valores médios continuam igual ao encontrado no modelo AHP clássico. Aqui também se RC for superior a 0.1, os julgamentos deverão ser refeitos. Prosseguindo com o processo de decisão, foi comparado as quatro estratégias (A1, A2, A3 e A4) em cada um dos critérios (C1, C2, C3, C4, C5) separadamente. Na Tabela 8, tem-se a matriz de comparação das alternativas em relação ao critério C1.

Tabela 8 – Matriz de Avaliação Fuzzy - Critério C1 x Alternativas.

C1	A1	A2	A3	A4
A1	(1, 1, 1)	(0.40, 0.48, 1)	(5.59, 7.61, 9)	(4.22, 5.65, 7)
A2	(1, 2.08, 2.92)	(1, 1, 1)	(3, 5, 7)	(3.30, 4.31, 5.31)
A3	(0.11, 0.13, 0.33)	(0.140, 0.20, 0.33)	(1, 1, 1)	(1, 1.44, 1.71)
A4	(0.14, 0.18, 0.24)	(0.18, 0.23, 0.33)	(0.58, 0.69, 1)	(1, 1, 1)

Fonte: Autoria própria.

$S_1 = (0.181, 0.456, 1.028)$; $S_2 = (0.173, 0.373, 0.881)$;

$S_3 = (0.044, 0.099, 0.209)$; $S_4 = (0.045, 0.072, 0.140)$

$$W^T = (0.555, 0.475, 0.117, 0.086) \rightarrow W = (0.450, 0.385, 0.095, 0.069)$$

Para o critério C2, é elaborada a Tabela 9, que representa a matriz fuzzificada do critério com relação as alternativas.

Tabela 9 – Matriz de Avaliação *Fuzzy* - Critério C2 x Alternativas.

C2	A1	A2	A3	A4
A1	(1, 1, 1)	(1, 1.44, 1.71)	(4.72, 6.80, 8.28)	(4.72, 6.80, 8.28)
A2	(0.58, 0.69, 1)	(1, 1, 1)	(1.71, 3.98, 6.08)	(1.44, 3.56, 5.59)
A3	(0.12, 0.15, 0.21)	(0.16, 0.25, 0.58)	(1, 1, 1)	(0.52, 0.58, 0.69)
A4	(0.14, 0.17, 0.31)	(0.18, 0.28, 0.69)	(1.44, 1.71, 1.91)	(1, 1, 1)

Fonte: Autoria própria.

$$S_1 = (0.237, 0.541, 1.122); S_2 = (0.113, 0.270, 0.730);$$

$$S_3 = (0.039, 0.077, 0.157); S_4 = (0.056, 0.112, 0.234)$$

$$W^T = (0.633, 0.371, 0.091, 0.134) \rightarrow W = (0.515, 0.302, 0.074, 0.109)$$

A Tabela 10 a seguir, apresenta a matriz de avaliação fuzzificada de C3 com relação as alternativas.

Tabela 10 – Matriz de Avaliação *Fuzzy* - Critério C3 x Alternativas.

C3	A1	A2	A3	A4
A1	(1, 1, 1)	(2.08, 2.71, 3.48)	(1.44, 2.47, 3.27)	(1.44, 2.47, 3.27)
A2	(0.36, 0.37, 0.41)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1.44, 1.71)
A3	(0.31, 0.41, 0.69)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1.59, 2.08)
A4	(0.31, 0.41, 0.69)	(0.58, 0.69, 1)	(0.48, 0.63, 1)	(1, 1, 1)

Fonte: Autoria própria.

$$S_1 = (0.357, 0.423, 0.582); S_2 = (0.150, 0.212, 0.234);$$

$$S_3 = (0.147, 0.222, 0.272); S_4 = (0.129, 0.143, 0.189)$$

$$W^T = (0.454, 0.199, 0.214, 0.154) \rightarrow W = (0.445, 0.195, 0.209, 0.151)$$

Para a Tabela 11, apresenta-se a matriz de avaliação fuzzificada de C4 com relação as alternativas.

Tabela 11 – Matriz de Avaliação *Fuzzy* - Critério C4 x Alternativas.

C4	A1	A2	A3	A4
A1	(1, 1, 1)	(2.47, 4.72, 6.80)	(2.47, 4.72, 6.80)	(1.44, 3.56, 5.59)
A2	(0.15, 0.21, 0.41)	(1, 1, 1)	(2.92, 3.66, 4.33)	(2.92, 3.66, 4.33)
A3	(0.15, 0.21, 0.41)	(0.23, 0.27, 0.34)	(1, 1, 1)	(1, 1.82, 2.47)
A4	(0.18, 0.28, 0.69)	(0.23, 0.27, 0.34)	(0.41, 0.55, 1)	(1, 1, 1)

Fonte: Autoria própria.

$$S_1 = (0.341, 0.473, 0.894); S_2 = (0.148, 0.314, 0.464);$$

$$S_3 = (0.050, 0.133, 0.208); S_4 = (0.051, 0.079, 0.128)$$

$$W^T = (0.570, 0.309, 0.130, 0.086) \rightarrow W = (0.520, 0.282, 0.119, 0.078)$$

E, por fim, a Tabela 12 contempla a matriz de avaliação fuzzificada de C5 com relação as alternativas:

Tabela 12 – Matriz de Avaliação *Fuzzy* - Critério C5 x Alternativas.

C5	A1	A2	A3	A4
A1	(1, 1, 1)	(2.08, 4.22, 6.26)	(0.58, 0.91, 1.19)	(1, 1.44, 1.71)
A2	(0.16, 0.24, 0.48)	(1, 1, 1)	(0.52, 0.58, 0.69)	(0.69, 1.14, 1.71)
A3	(0.84, 1.10, 1.71)	(1.44, 1.71, 1.91)	(1, 1, 1)	(1, 1.44, 1.71)
A4	(0.58, 0.69, 1)	(0.58, 0.87, 1.44)	(0.58, 0.69, 1)	(1, 1, 1)

Fonte: Autoria própria.

$$S_1 = (0.429, 0.390, 0.449); S_2 = (0.118, 0.157, 0.172);$$

$$S_3 = (0.216, 0.283, 0.288); S_4 = (0.150, 0.170, 0.188)$$

$$W^T = (0.423, 0.149, 0.262, 0.169) \rightarrow W = (0.423, 0.149, 0.262, 0.169)$$

Com isso, a Tabela 13 apresenta a nova matriz de decisão, onde as prioridades foram obtidas a partir de matrizes de comparação *fuzzy* de alternativas referentes a cada critério agregado de matrizes individuais de acordo com cada especialista.

Tabela 13 – Prioridades locais e globais de estratégia para manutenção fuzzificada.

Estratégia	C1 (20.6%)	C2 (7.4%)	C3 (33.4%)	C4 (32.5%)	C5 (6.1%)	Global
Corretiva (A1)	45.0%	51.5%	44.5%	52.0%	42.1%	47.4%
Preventiva (A2)	38.5%	30.2%	19.5%	28.2%	14.8%	26.7%
Preditiva (A3)	9.5%	7.4%	20.9%	11.9%	26.1%	15.0%
Proativa (A4)	6.9%	10.9%	15.1%	7.8%	16.9%	10.9%

Fonte: Autoria própria.

Assim, fazendo os devidos cálculos, tem-se que a manutenção corretiva (A1) ficou com a maior porcentagem, 47,4%, seguido da manutenção preventiva (A2) com 26,7%, da manutenção preditiva (A3) com 15,0% e da manutenção proativa (A4) com 10.9%.

4.3 APLICAÇÃO DO MAUT

Para a utilização do métodos de apoio multicritério MAUT, seguiram-se os passos conforme citado no item 3.1, onde os membros do comitê de especialistas da manutenção responderam individualmente e sem conhecimento das notas atribuídas pelos outros especialistas um formulário de preferências. Neste formulário, os especialistas atribuem notas aos critérios pelo método de ponderação direta em uma escala de um (1) a dez (10), onde os valores de pior referência correspondem ao valor um e os valores de melhor referência correspondem ao valor 10, a fim de tornar a atribuição de valores menos subjetiva.

As escalas de medição utilizada para os critérios são a Ordinal, convertida em numérica para Criticidade do Equipamento (X1) e para a Probabilidade de Quebra (X2), a Numérica para Tempo de Reposição (X3), para Quantidade de Fornecedores (X4) e para Especificação Técnica (X5). Para o custo (X6), a escala de medição é a Numérica Monetária. As notas para os critérios estão na Tabela 14.

Tabela 14 – Notas atribuídas pelos especialistas nos critérios.

Critérios	E1 Nota	E2 Nota	E3 Nota
Criticidade (X1)	10	10	8
Probabilidade de Quebra (X2)	9	5	10
Tempo de Reposição (X3)	9	9	9
Quantidade de Fornecedores (X4)	5	6	6
Especificação Técnica (X5)	5	8	5
Custo (X6)	7	7	3

Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma, foi feita a avaliação dos critérios com relação aos subcritérios e inseridas na Tabela 15.

Tabela 15 – Notas dos especialista para os subcritérios.

	X1			X2			X3		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Vital (Y1)	9	9	6	8	5	3	7	9	9
Essencial (Y2)	7	5	4	7	5	5	7	1	5
Desejável (Y3)	8	9	5	8	9	7	8	9	7
Zero (Y4)	6	4	3	6	4	2	6	5	5
	X4			X5			X6		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Vital (Y1)	5	9	5	5	5	5	3	2	1
Essencial (Y2)	6	1	5	6	5	3	4	2	3
Desejável (Y3)	7	9	5	7	5	6	5	3	4
Zero (Y4)	4	5	5	4	5	2	6	5	7

Fonte: Autoria própria.

Em seguida, calculou-se a soma das notas, para saber sua posição com relação aos outros critérios e subcritérios. Nas Tabelas 16 e 17 trazem estes valores e os pesos finais dos critérios e subcritérios, utilizando a técnica *Swing Weight*, conforme Equação 30, que é utilizada em situações de mensuração de pesos e é de grande auxílio na construção intuitiva.

$$\text{Peso do Critério} = \frac{\text{Nota Critério}}{\text{Soma das notas do Critério}} \quad (30)$$

Tabela 16 – Peso dos critérios.

Critérios	Soma	Posição	Peso
Criticidade (X1)	28	1	0.214
Probabilidade de Quebra (X2)	24	3	0.183
Tempo de Reposição (X3)	27	2	0.206
Quantidade de Fornecedores (X4)	17	5	0.130
Especificação Técnica (X5)	18	4	0.137
Custo (X6)	17	5	0.130

Fonte: Autoria própria.

Assim, conforme as notas dadas pelo comitê especialista, foi encontrado o peso dos julgamentos para os critérios de gestão de peças sobressalentes. O critério Criticidade (X1) possui a maior importância, com peso de 21.4%, seguido do critério Tempo de Reposição (X3) com 20.6%, Probabilidade de Quebra (X2) com 18.3%, Especificação Técnica (X5) com 13.7% e empatados na última posição, Quantidade de Fornecedores (X4) e Custos (X6) com 13.0%.

Tabela 17 – Peso dos subcritérios.

	X1			X2			X3		
	Soma	Posição	Peso	Soma	Posição	Peso	Soma	Posição	Peso
Vital (Y1)	24	1	0.32	16	3	0.23	25	1	0.32
Essencial (Y2)	16	3	0.21	17	2	0.25	13	4	0.17
Desejável (Y3)	22	2	0.29	24	1	0.35	24	2	0.31
Zero (Y4)	13	4	0.17	12	4	0.17	16	3	0.21
	X4			X5			X6		
	Soma	Posição	Peso	Soma	Posição	Peso	Soma	Posição	Peso
Vital (Y1)	19	2	0.29	15	2	0.26	6	4	0.13
Essencial (Y2)	12	4	0.18	14	3	0.24	9	3	0.20
Desejável (Y3)	21	1	0.32	18	1	0.31	12	2	0.27
Zero (Y4)	14	3	0.21	11	4	0.19	18	1	0.40

Fonte: Autoria própria.

Com os pesos dos critérios e subcritérios determinados, é possível calcular a função de valor global, utilizando-se de uma função de valor aditiva para obter uma aproximação bastante adequada para o estabelecimento desta função de valor global, que está inserida na Tabela 18.

Tabela 18 – Prioridades locais e globais da gestão de peças para a manutenção.

Classificação	X1 (24.3%)	X2 (20.9%)	X3 (18.3%)	X4 (11.3%)	X5 (13.0%)	X5 (12.2%)	Global
Vital (Y1)	32.0%	23.2%	32.1%	28.8%	25.9%	13.3%	26.7%
Essencial (Y2)	21.3%	24.6%	16.7%	18.2%	24.1%	20.0%	21.0%
Desejável (Y3)	29.3%	34.8%	30.8%	31.8%	31.0%	26.7%	30.9%
Zero (Y4)	17.3%	17.4%	20.5%	21.2%	19.0%	40.0%	21.3%

Fonte: Autoria própria.

Onde, para cada subcritério, a função de valor pode ser expressa pela Equação 31:

$$V(Y_1, Y_2, Y_3, Y_4) = K_{X1}(V_{X1}) + K_{X2}(V_{X2}) + K_{X3}(V_{X3}) + K_{X4}(V_{X4}) + K_{X5}(V_{X5}) + K_{X6}(V_{X6}) \quad (31)$$

Com isso, mediante aplicação do MAUT, a alternativa Desejável (Y3) foi a que apresentou o maior valor de utilidade com 30.9%, seguida pela alternativa Vital (Y1) com 26.7%, depois da alternativa Zero (Y4) com 21.3% e, por último, a alternativa Essencial (Y2) com 21.0%.

4.4 APLICAÇÃO DO MAUT FUZZY

Neste tópico, a teoria dos conjuntos *fuzzy* é integrado ao MAUT e um modelo de utilidade com atributos múltiplos fuzzificado é proposto para modelar o problema na gestão de peças sobressalentes.

Com base no item 3.2, os três especialistas membros do comitê (E1, E2 e E3) expressaram suas prioridades com as seguintes classificações: sem importância (SI), baixa importância (BI), importante (I), alta importância (AI) e extremamente importante (EI) para os mesmo seis critérios analisados no estudo de gestão de peças sobressalentes: criticidade do equipamento (X1), probabilidade de quebra (X2), tempo de reposição (X3), quantidade de fornecedores (X4), especificação técnica (X5) e custo (X6). Estas avaliações encontra-se na Tabela 19.

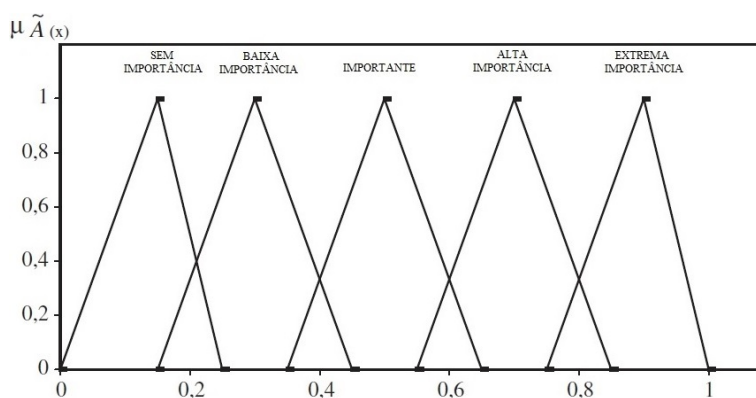
Tabela 19 – Avaliação dos critérios pelos especialistas.

Critério	E1	E2	E3
X1	EI	EI	I
X2	EI	BI	I
X3	EI	EI	EI
X4	I	SI	BI
X5	I	I	SI
X6	AI	BI	SI

Fonte: Autoria própria.

Neste estudo é utilizado os números *fuzzy* triangulares como funções de associação, correspondendo aos elementos em um conjunto, pelo motivo de que é intuitivamente fácil para os tomadores de decisão usarem e calcularem. O número *fuzzy* triangular pode ser mostrado como (l, m, u) . Os parâmetros l , m e u , respectivamente, denotam o menor valor possível, o valor mais promissor e o maior valor possível que descreve um evento *fuzzy*. As funções triangulares de associação *fuzzy* e os termos linguísticos definidos são mostrados na Figura 18 e na Tabela 20, respectivamente.

Figura 18 – Função de associação *fuzzy*.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 20 – Termos lingüísticos usados na matriz de decisão.

Termo Linguístico	Valor Linguístico
Sem Importância (SI)	(0.00, 0.15, 0.25)
Baixa Importância (BI)	(0.15, 0.30, 0.45)
Importante (I)	(0.35, 0.50, 0.65)
Alta Importância (AI)	(0.55, 0.70, 0.85)
Extrema Importância (EI)	(0.75, 0.90, 1.00)

Fonte: Autoria própria.

Assim, a Tabela 21 apresenta a matriz média de comparações pareadas fuzzificadas dos critérios de julgamento dos especialistas.

Tabela 21 – Comparações fuzzificadas dos critérios para gestão de peças sobressalentes.

Critério	E1	E2	E3	Valor Linguístico
X1	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.55, 0.70, 0.85)	(0.68, 0.83, 0.95)
X2	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.62, 0.77, 0.88)
X3	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.75, 0.90, 1.00)
X4	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.35, 0.50, 0.65)
X5	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.55, 0.70, 0.85)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.42, 0.57, 0.72)
X6	(0.55, 0.70, 0.85)	(0.55, 0.70, 0.85)	(0.15, 0.30, 0.45)	(0.42, 0.57, 0.72)

Fonte: Autoria própria.

Por meio da Equação 11 mostrada previamente no trabalho, foi encontrado as Medidas Sintéticas *Fuzzy* (S_i):

$$S_1 = (0.139, 0.202, 0.294); S_2 = (0.125, 0.185, 0.273); S_3 = (0.153, 0.218, 0.309); \\ S_4 = (0.017, 0.121, 0.201); S_5 = (0.085, 0.137, 0.222); S_6 = (0.085, 0.137, 0.222);$$

Mais uma vez, comparando as Medidas Sintéticas *Fuzzy* (S_i) encontradas e a partir das Equações 20 e 21 chega-se aos vetores W^T e W :

$$W^T = (0.211, 0.195, 0.227, 0.131, 0.148, 0.148) \rightarrow W = (0.200, 0.184, 0.214, 0.124, 0.140, 0.140)$$

Conforme as notas dadas pelo comitê de especialista, foi encontrado o peso dos julgamento para os critérios de gestão de peças sobressalentes pelo método *fuzzy* MAUT. O critério Tempo de Reposição (X3) foi o de maior valor, com peso de 21.4%. Seguido do critério Criticidade (X1) com 20.0%, depois o critério Probabilidade de Quebra (X2) com 18.4%. Em seguida vem empatados os critérios Especificação Técnica (X5) e Custos (X6) com 14.0% e por último o critério Quantidade de Fornecedores (X4) com 12.4%.

Agora, fazendo o processo de fuzzificação nas avaliações de prioridade com os quatros subcritérios para a gestão de peças sobressalentes - Vital (Y1), Essencial (Y2), Desejável (Y3) e Zero (Y4) com relação a cada um dos critérios. Para o critério X1, Criticidade, tem-se a comparação fuzzificada da Tabela 22.

Tabela 22 – Notas fuzzificadas do critério X1 para os subcritérios.

	X1		
	E1	E2	E3
Y1	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.35, 0.50, 0.65)
Y2	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.35, 0.50, 0.65)
Y3	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.35, 0.50, 0.65)
Y4	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.35, 0.50, 0.65)

Fonte: Autoria própria.

Para o critério X2 - Probabilidade de Quebra, é feito o mesmo processo de comparação fuzzificada, o que resulta na Tabela 23.

Tabela 23 – Notas fuzzificadas do critério X2 para os subcritérios.

	X2		
	E1	E2	E3
Y1	(0.55, 0.70, 0.85)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.15, 0.30, 0.45)
Y2	(0.55, 0.70, 0.85)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.35, 0.50, 0.65)
Y3	(0.55, 0.70, 0.85)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.55, 0.70, 0.85)
Y4	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.15, 0.30, 0.45)	(0.00, 0.15, 0.25)

Fonte: Autoria própria.

Também para o critério X3 - Tempo de reposição, é feito o processo de comparação fuzzificada, o que resulta na Tabela 24.

Tabela 24 – Notas fuzzificadas do critério X3 para os subcritérios.

	X3		
	E1	E2	E3
Y1	(0.55, 0.70, 0.85)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.75, 0.90, 1.00)
Y2	(0.55, 0.70, 0.85)	(0.00, 0.15, 0.25)	(0.35, 0.50, 0.65)
Y3	(0.55, 0.70, 0.85)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.55, 0.70, 0.85)
Y4	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.35, 0.50, 0.65)

Fonte: Autoria própria.

Para o critério X4 - Quantidade de fornecedores, é feito o mesmo processo de comparação fuzzificada, o que resulta na Tabela 25.

Tabela 25 – Notas fuzzificadas do critério X4 para os subcritérios.

	X4		
	E1	E2	E3
Y1	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.35, 0.50, 0.65)
Y2	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.00, 0.15, 0.25)	(0.35, 0.50, 0.65)
Y3	(0.55, 0.70, 0.85)	(0.75, 0.90, 1.00)	(0.35, 0.50, 0.65)
Y4	(0.15, 0.30, 0.45)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.35, 0.50, 0.65)

Fonte: Autoria própria.

Para o critério X5 - Especificação técnica, é feito o mesmo processo de comparação fuzzificada, o que resulta na Tabela 26.

Tabela 26 – Notas fuzzificadas para o critério X5 para os subcritérios.

	X5		
	E1	E2	E3
Y1	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.35, 0.50, 0.65)
Y2	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.15, 0.30, 0.45)
Y3	(0.55, 0.70, 0.85)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.35, 0.50, 0.65)
Y4	(0.15, 0.30, 0.45)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.00, 0.15, 0.25)

Fonte: Autoria própria.

Para o critério X6 - Custos, é feito o mesmo processo de comparação fuzzificada, o que resulta na Tabela 27.

Tabela 27 – Notas fuzzificadas para o critério X6 para os subcritérios.

	X6		
	E1	E2	E3
Y1	(0.15, 0.30, 0.45)	(0.00, 0.15, 0.25)	(0.00, 0.15, 0.25)
Y2	(0.15, 0.30, 0.45)	(0.00, 0.15, 0.25)	(0.15, 0.30, 0.45)
Y3	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.15, 0.30, 0.45)	(0.15, 0.30, 0.45)
Y4	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.35, 0.50, 0.65)	(0.55, 0.70, 0.85)

Fonte: Autoria própria.

Com isso, a Tabela 28 apresenta uma nova matriz de decisão, onde as prioridades foram obtidas a partir de matrizes de comparação fuzzy de alternativas referentes a cada critério agregado de matrizes individuais de acordo com a avaliação de cada especialista.

Tabela 28 – Prioridades locais e globais de estratégia para manutenção fuzzificada.

Estratégia	X1 (20.0%)	X2 (18.4%)	X3 (21.4%)	X4 (12.4%)	X5 (14.0%)	X6 (14.0%)	Global
Vital (Y1)	32.2%	23.5%	32.2%	29.2%	27.5%	14.8%	27.2%
Essencial (Y2)	21.8%	26.5%	17.8%	18.0%	24.0%	18.6%	21.2%
Desejável (Y3)	29.8%	35.0%	29.9%	32.2%	30.9%	26.8%	30.8%
Zero (Y4)	16.2%	15.0%	20.0%	20.6%	17.6%	39.8%	20.8%

Fonte: Autoria própria.

Assim, fazendo todos os cálculos necessários, tem-se que os itens classificados com desejáveis (Y3) apresentaram a maior valor em porcentagem, com 30.8%, seguido dos itens classificados como vitais (Y1) com 27.2%, dos itens essenciais (Y2) com 21.2% e, finalmente, dos itens denominados como zero (Y4) com 20.8%.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o estudo de caso da escolha da melhor estratégia de manutenção, onde foi utilizado os dois métodos de decisão por multicritérios, o AHP e o FAHP, pode-se fazer uma tabela comparativa para observarmos melhor as variações nos critérios e subcritérios. A Figura 19 e as Tabelas 29 e 30 contemplam esta comparação.

Tabela 29 – Comparação resultados dos métodos de estratégia para manutenção.

	C1		C2		C3		C4		C5	
	AHP (17.3%)	FAHP (20.6%)	AHP (6.4%)	FAHP (7.4%)	AHP (38.0%)	FAHP (33.4%)	AHP (30.7%)	FAHP (32.5%)	AHP (7.6%)	FAHP (6.1%)
A1	38.3%	45.6%	51.7%	51.5%	45.7%	44.5%	64.1%	52.0%	36.1%	42.1%
A2	46.4%	38.9%	32.0%	30.2%	19.3%	19.5%	17.6%	28.2%	14.8%	14.8%
A3	7.9%	8.7%	6.9%	7.4%	20.3%	20.9%	7.6%	11.9%	30.2%	26.1%
A4	7.4%	6.7%	9.3%	10.9%	14.7%	15.1%	10.7%	7.8%	18.9%	16.9%

Fonte: Autoria própria.

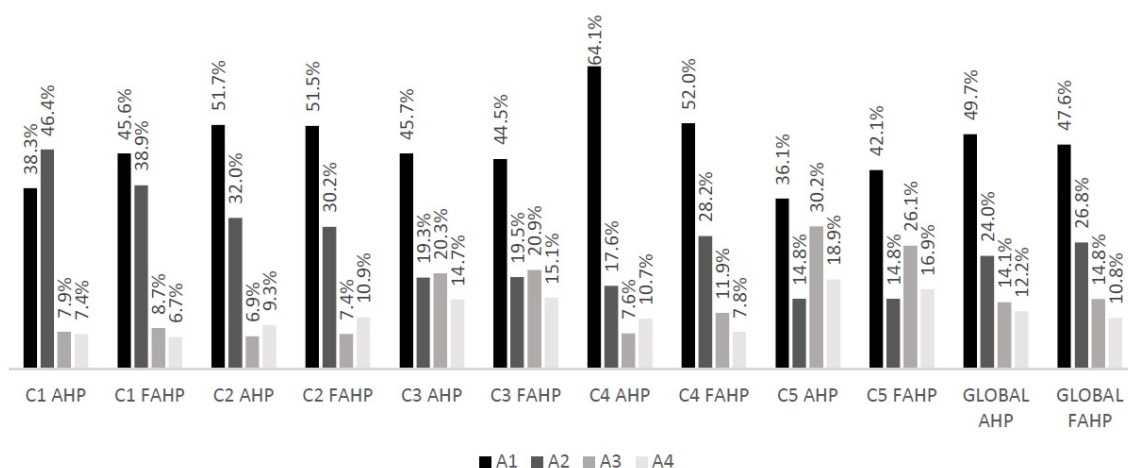
Nesta análise percebe-se que, apesar da conveniência do método AHP clássico em manipular os critérios para a tomada de decisão, a imprecisão e falta de algumas definições podem causar

Tabela 30 – Prioridades locais e globais de estratégia para manutenção.

	Global	
	AHP	FAHP
A1	49.7%	47.6%
A2	24.0%	26.8%
A3	14.1%	14.8%
A4	12.2%	10.8%

Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Comparação entre AHP e FAHP.



Fonte: Autoria própria.

julgamentos imprecisos com abordagens convencionais. Para preencher essa lacuna, a adição da lógica *fuzzy* no método AHP auxilia na captura da imprecisão do pensamento humano e contribuir para uma resolução mais estruturada do problema. A Tabela 29 mostra que os valores dos critérios foram muito próximos e que as posições de C1 (3º lugar), C3 (1º lugar) e C4 (2º lugar) mantiveram iguais nos dois métodos, mas as posições de C2 e C5 foram diferentes (no AHP, C2 ficou em 4º lugar e C5 em 5º lugar e no FAHP, C2 ficou em 5º lugar e C5 em 4º lugar).

Nos subcritérios, houve alterações nas comparações dos critérios C1 e C4, conforme ilustrado na Figura 19 e na Tabela 30. Em C1, as posições do subcritério A1 e A2 ficaram em posições alternadas, sendo que no AHP o subcritério A1 ficou na segunda posição (38.9%) e no FAHP alcançou a primeira posição (45.6%). Para a comparação no critério C4, no AHP o subcritério A4 ficou com 10.7%, na terceira posição e o critério A3 ficou na quarta posição com 7.6%. Pelo critério do FAHP, estas posições se invertem: o A3 passou a ocupar a terceira posição com 11.9% e o A4 passou para a quarta posição com 7.8%.

Para as propriedades globais, que estão ilustradas na Tabela 30 e na Figura 19, não houve mudanças nas posições: o subcritério A1 ficou na primeira posição com 49.7% no AHP e 47.6% no FAHP. O A2 ficou na segunda posição com 24.0% no AHP e 26.8% no FAHP, o A3 ficou na terceira posição com 14.1% no AHP e 14.8% no FAHP e, por fim, o A4 na quarta posição com 12.2% no AHP e 10.8% no FAHP.

Outro fato a se observar é de que todas as matrizes de comparação obtiveram a Razão de Consistência (RC) menor que 0.10, tanto no método AHP como no FAHP, o que mostra a convergência de

valores de julgamento do comitê de especialistas.

Agora, aplicando os dois métodos multicritérios para selecionar uma melhor gestão das peças sobressalentes, o MAUT e seu aditivo fuzzificado FMAUT, é possível formar uma tabela com os valores encontrados para melhor compará-los. Esta comparação se encontra nas Tabelas 31 e 32.

Tabela 31 – Prioridades locais de X1, X2, X3 e X4 para gestão de peças sobressalentes.

	X1		X2		X3		X4	
	MAUT (21.4%)	FMAUT (20.0%)	MAUT (18.3%)	FMAUT (18.4%)	MAUT (20.6%)	FMAUT (21.4%)	MAUT (13.0%)	FMAUT (12.4%)
Y1	32.0%	32.2%	23.2%	23.5%	31.1%	31.2%	28.8%	29.2%
Y2	21.3%	21.8%	24.6%	26.5%	16.7%	17.8%	18.2%	18.0%
Y3	29.3%	29.8%	34.8%	35.0%	30.8%	29.9%	31.8%	32.2%
Y4	17.3%	16.2%	17.4%	15.0%	20.5%	20.0%	21.2%	20.6%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 31 – Prioridades locais de X5 e X6 para gestão de peças sobressalentes.

	X5		X6	
	MAUT (13.7%)	FMAUT (14.0%)	MAUT (13.0%)	FMAUT (14.0%)
Y1	25.9%	27.5%	13.3%	14.8%
Y2	24.1%	24.0%	20.0%	18.6%
Y3	31.0%	30.9%	26.7%	26.8%
Y4	19.0%	17.6%	40.0%	39.8%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 32 – Prioridades globais para gestão de peças sobressalentes.

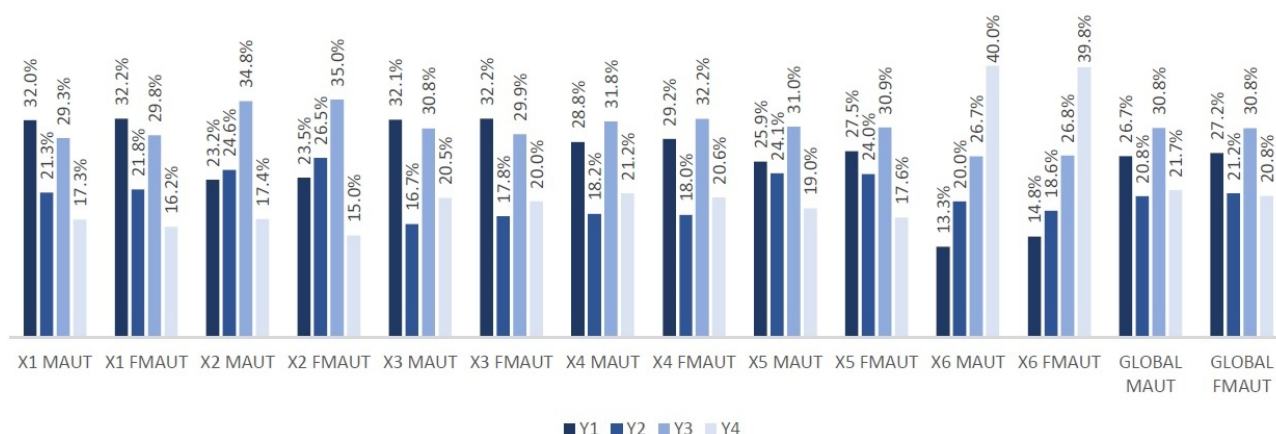
	Global	
	MAUT	FMAUT
Y1	26.7%	27.2%
Y2	20.8%	21.2%
Y3	30.8%	30.8%
Y4	21.7%	20.8%

Fonte: Autoria própria.

Utilizando o método MAUT percebe-se que sua a maior vantagem é sua aplicação ser possível em análises de decisões quantitativos e qualitativos. Pode-se fazer a quantificação associando um valor abstrato de utilidade para cada uma das situações possíveis, tornando um problema sem correspondente número ou monetário em valores de utilidade.

A Figura 20 mostra a comparação entre os subcritérios e as Tabelas 31 e 32 mostram a comparação entre os critérios e subcritérios MAUT e FMAUT. Percebe-se que valores dos subcritérios encontrados foram próximos, não havendo variação nas comparações em X1, X2, X3, X4, X5 e X6. Mas o valor Global houve variação, com Y4 (21.7%) ocupando a terceira posição e Y2 (20.8%) ocupando a quarta posição no MAUT, sendo que no FMAUT a terceira posição ficou com Y2 (21.2%) e a quarta posição ficou com Y4 (20.8%). Na comparação entre os critérios, houve uma maior variação nas posições e

Figura 20 – Comparação entre MAUT e FMAUT.



Fonte: Autoria própria.

apenas os critérios X2 e X5 mantiveram as mesmas posições em ambos os métodos (terceira e quarta posições), sendo que no método FMAUT esta quarta posição também é dividida com X6. Para as demais posições ficara o seguinte: a primeira posição ficou com X1 (21.4%) no MAUT e com X3 (21.4%) no FMAUT, a segunda posição X3 (20.6%) no MAUT e no FMAUT ficou X1 (20.0%). A quinta posição ficou empatados X4 (13.0%) e X5 (13.0%) no método MAUT e a sexta posição no método FMAUT ficou X4 (12.4%).

Como se pode verificar pelos resultados e pela análise de sensibilidade, o principal objetivo da utilização da MAUT não foi fornecer uma solução única e sim apoiar o decisor ao longo de todo o processo decisório. A adição da lógica *fuzzy* a metodologia tem o intuito de diminuir a subjetividade e através da modelagem do problema, garantiu-se uma maior transparência ao processo decisório.

Utilizando as duas ferramentas de decisão e seus adicionais fuzzificados, observou-se que o MAUT é um método mais simples e mais fácil de se compreender pelos avaliadores, fazendo com que sua implementação ocorra em menor tempo. No AHP, observa-se um menor risco de inconsistência nos julgamentos pessoais dos avaliadores, mas com o agravante de que o processo se torna mais lento, requerendo uma matemática um pouco mais complexo e que em alguns casos, necessita-se de algum software para efetuar os cálculos da modelagem. Em ambos os métodos, a efetividade dos resultados depende da competência dos avaliadores em fazer assertivos seus julgamentos de valor. Portanto, o AHP está mais sujeito à não efetividade por exigir maior quantidade de julgamentos, o que pode invalidar os resultados, caso não sejam consistentes, o que nos leva a concluir que o MAUT é um método mais intuitivo, com abordagem matemática menos complexa, apresentando maior potencial para uma aplicação inicial da MCDA. Para a gestão da manutenção industrial estes dois métodos são de grande auxílio no apoio às decisões tomadas pelos gestores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse capítulo contempla a verificação dos objetivos e respostas às questões de pesquisa preestabelecidas, a produção científica resultante do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS E AS RESPOSTAS AS QUESTÕES

O objetivo desta pesquisa foi mostrar a influência da imprecisão nos problemas da gestão da manutenção industrial devido as incertezas dos julgamentos. Para o atendimento do objetivo geral, que é solucionar problemas de subjetividade na gestão da manutenção industrial com a aplicação dos métodos e técnicas de análise multicritério, foi feito uma pesquisa na literatura dos principais métodos de decisão multicritério e da gestão matemática da incerteza. Com a limitação da área de atuação restrita ao grupo tomador das decisões de manutenção de uma indústria metalúrgica.

No Capítulo 2 apresenta um embasamento teórico sobre Manutenção, apresentando todo o histórico da manutenção e os tipos de manutenção. Também neste capítulo é abordado os tipos de gestão da manutenção e suas concepções mais usadas, o planejamento e controle da manutenção, a gestão de peças sobressalentes e a lógica *fuzzy*, dando destaque a teoria dos conjuntos *Fuzzy*, os números *Fuzzy* e suas variáveis linguísticas.

No Capítulo 3 é descrita a modelagem multicritério, contextualizando os problemas da pesquisa, que é a busca da melhor escolha das estratégias de manutenção e a escolha do melhor método de gestão das peças sobressalentes. Também é apresentado os critérios e subcritérios para cada um dos dois pontos que são objetos de estudo. Ainda no Capítulo 3 encontra-se a apresentação dos métodos de tomada de decisão multicritério, dando destaque ao método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), sua versão com o aditivo fuzzificador, o *Fuzzy AHP* e o *Multi-attribute utility Theory* (MAUT) e também sua versão fuzzificada, o *Fuzzy MAUT*.

Para o Capítulo 4 são apresentadas as aplicações referentes à avaliação de cada etapa. Em ambos os casos, foi elaborado um questionário para avaliação das preferências e respondido pelo comitê responsável pelas decisões da manutenção para aplicar os métodos de decisão multicritério AHP, FAHP, MAUT e o FMAUT. Estes resultados foram agrupados em tabelas, onde é observado a importância de cada critério e subcritério na análise deste problema. Para o primeiro estudo para a melhor estratégia de manutenção, o resultado desta análise reafirma que o AHP é sensível à incerteza no modelo de decisão e fazendo a análise comparativa, foi obtido algumas diferenças na classificação dos critérios e dos subcritérios: C1, C2, C4 mantiveram-se nas mesmas posições em ambos os métodos e A1, A2, A3 e A4 mantiveram suas posições no dois critérios. Apesar de contrariar os princípios da evolução da manutenção para alcançar a Manutenção de Classe Mundial, onde busca minimizar custos e combater a falta de eficácia da manutenção, o resultado mostra somente o estágio atual da manutenção. E estas diferenças não resultam necessariamente em diferentes opções de seleção, mas sim em diferentes abordagens para seleção de opções, pois o índice de consistência manteve-se conforme recomendado ($RC < 0.10$). Essa descoberta fornece uma nova direção para a seleção do método MCDM para fins de planejamento.

Se o planejamento tem como objetivo identificar áreas prioritárias, os métodos mais simples de MCDM, como o AHP, são suficientes. A utilização de técnicas mais sofisticadas, como o *Fuzzy AHP*, pode ser visto como um tabu pelas partes interessadas e que não gerará necessariamente resultados diferentes. Agora, se for necessário um planejamento mais detalhado, uma abordagem híbrida usando duas ou mais técnicas de MCDM seria ideal para alcançar uma maior confiança na identificação da opção preferida.

Para a escolha da melhor gestão de peças sobressalentes, o mesmo comitê de julgamento analisou e julgou os critérios e subcritérios relevantes, mesmo que esse processo envolva questões subjetivas que não podem ser mensuradas com exatidão. Aplicado o método MAUT e também com o aditivo *fuzzy*, o FMAUT onde, analisando os resultados da aplicação destes métodos, permitiram uma análise criteriosa do processo de gestão das peças sobressalentes de manutenção e este estudo permitiu também aos participantes do comitê decisor um maior aprendizado sobre o problema estudado, seus valores e prioridades. A aplicação da metodologia mostrou-se rápida e relativamente simples, onde a única dificuldade foi a de atribuição dos pesos dos critérios, pois o procedimento de quantificar a preferência entre critérios não se mostraram tão intuitivo para o agente de decisão. No caso estudado, na comparação entre os dois métodos, houve uma grande variação nas posições dos critérios, com somente X2 e X5 mantendo suas posições e para os subcritérios, apenas Y1 e Y2 mantiveram as mesmas posições no MAUT e no FMAUT, o que indica pode haver algum mal entendido no julgamento dos decisores ou que o modelo VED para classificação das peças sobressalentes não seja o mais indicado para a empresa.

Outro detalhe importante é que também foi possível perceber que uma simples mudança na avaliação do decisor poderia indicar outra preferência, sendo que estas decisões envolviam subjetividades, tratadas por meio da lógica *fuzzy*. No entanto, mesmo com alguns resultados adversos, o trabalho mostrou que o MCDA pode ser usado para solucionar os problemas de subjetividade na gestão da manutenção industrial.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros, poderiam aplicar esta mesma metodologia para outros segmentos empresariais: saúde, varejo, telecomunicações, óleo e gás, financeiro e etc. Estas empresas têm suas próprias preferências e necessidades, conduzindo a um processo de seleção com critérios e pesos diferenciados.

Uma nova pesquisa poderia ser realizada ampliando a abrangência do comitê responsável pelo processo de manutenção, incluindo mais integrantes de outros setores da empresa. Com isso, haveria um maior alinhamento entre o julgamento do comitê e as preferências da organização com um todo, tornando a modelagem do processo decisório mais próxima das necessidades da empresa.

Pode-se também utilizar outros métodos de tomada de decisão em novos estudos, como o da escola Europeia por exemplo, para enriquecer a análise, assim como o próprio MAUT Monte-Carlo utilizando probabilidades, além de aplicar o outras técnicas *Fuzzy*, como o *Hesitant Fuzzy Sets* (HFS) e o *Intuitionistic Fuzzy Sets* (IFS) num contexto mais enriquecido de informações que simulam maiores situações de risco.

Por fim, outra sugestão é a criação de mecanismos e critérios para desempate. Quando ocorrer este cenário, deve estar claramente definido quais os procedimentos a executar de forma a se chegar a um resultado que possa ser justificado com a máxima segurança. Vale também dizer que o objetivo de todas essas sugestões é fazer com que o processo de gerenciamento do risco para a tomada de decisões na gestão da manutenção sejam o mais claro possível, baseadas em informações que representam os cenários reais e acessível a todos os agentes envolvidos no processo.

REFERÊNCIAS

- ABRAMAN. **Documento Nacional**. 2017. Disponível em: <"<https://docplayer.com.br/105100568-Resultado-do-documento-nacional-2017.html>">. Acesso em: 15 Jan. 2019.
- ACHILLAS, C. et al. The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: A literature review. **Waste Management and Research**, United Kingdom, v. 31, n. 2, p. 115–129, 2013. ISSN 1096-3669. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84874054333&doi=10.1177%2f0734242X12470203&partnerID=40&md5=0ac60f0fa3a6d2e8b2188731eb8a6ce4>>. Acesso em: 01 mar. 2020.
- ADALI, E. A.; İŞİK, A. T. Critic and maut methods for the contract manufacturer selection problem. **European Journal of Multidisciplinary Studies**, Albania, v. 2, n. 5, p. 93–101, 2017. ISSN 2414-8385. Disponível em: <<http://journals.euser.org/index.php/ejms/article/view/2326>>. Acesso em: 15 mar. 2020.
- AL-TURKI, U. A framework for strategic planning in maintenance. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, United Kingdom, v. 17, n. 2, p. 150–162, 2011. ISSN 1355-2511. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/13552511111134583>>. Acesso em: 4 fev. 2020.
- ALMEIDA, A. D.; FERREIRA, R.; CAVALCANTE, C. A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability. **IMA Journal of Management Mathematics**, United Kingdom, v. 26, n. 3, p. 249–271, 2015. ISSN 1471-678X. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84937397393&doi=10.1093%2fimaman%2fdpv010&partnerID=40&md5=40c5852bdd0327b229963b6c86ca3325>>. Acesso em: 11 mar. 2020.
- ANANDA, J.; HERATH, G. A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. **Ecological Economics**, Netherlands, v. 68, n. 10, p. 2535–2548, 2009. ISSN 0921-8009. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-67649117907&doi=10.1016%2fj.ecolecon.2009.05.010&partnerID=40&md5=928a4f7a2f61078d4b112e169540095a>>. Acesso em: 23 abr. 2019.
- ARIF, F.; BAYRAKTAR, M.; CHOWDHURY, A. Decision support framework for infrastructure maintenance investment decision making. **Journal of Management in Engineering**, United States, v. 32, n. 1, 2016. ISSN 0742-597X. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84950270555&doi=10.1061%2f%28ASCE%29ME.1943-5479.0000372&partnerID=40&md5=f225daabfe8ae5eea1e414ab9b87d70>>. Acesso em: 11 mar. 2020.
- ARUNRAJ, N.; MAITI, J. Risk-based maintenance-techniques and applications. **Journal of Hazardous Materials**, Netherlands, v. 142, n. 3, p. 653–661, 2007. ISSN 0304-3894. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33947390406&doi=10.1016%2fj.jhazmat.2006.06.069&partnerID=40&md5=9fb46abbcea1ee71e6594a37756c60e0>>. Acesso em: 18 dez. 2019.
- ARUNRAJ, N. S.; MAITI, J. Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming. **Safety Science**, Elsevier Ltd, Netherlands, v. 48, n. 2, p. 238–247, 2010. ISSN 09257535. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2009.09.005>>. Acesso em: 10 dez. 2018.
- BACCHETTI, A. et al. Spare parts classification and inventory management: a case study. **Salford Business School Working Papers Series**, University of Salford, United Kingdom, v. 408, n. 1, p. 1–32, 2010. ISSN 1751-2700. Disponível em: <<http://usir.salford.ac.uk/id/eprint/19054>>. Acesso em: 9 fev. 2019.

BACCHETTI, A.; SACCANI, N. Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. **Omega**, United Kingdom, v. 40, n. 6, p. 722–737, 2012. ISSN 0305-0483. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84858746230&doi=10.1016%2fj.omega.2011.06.008&partnerID=40&md5=c683d3b730fff7c79b8d502c261821c3>>. Acesso em: 21 fev. 2020.

BANKS, W. Linguistic variables: Clear thinking with fuzzy logic. **Byte Craft Limited**, Canada, v. 1, n. 1, p. 1–18, 2008. Disponível em: <<http://www.phaedsys.com/principals/bytecrafter/bytecrafterdata/LinguisticVariables.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2020.

BELTON, V.; STEWART, T. **Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach**. 1. ed. United Kingdom: Springer US, 2002. (Springer Nature Book Archives Millennium). ISBN 9780792375050. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=mxNsRnNkL1AC>>. Acesso em: 28 Mar. 2019.

BERTOLINI, M.; BEVILACQUA, M. A combined goal programming - ahp approach to maintenance selection problem. **Reliability Engineering and System Safety**, United Kingdom, v. 91, n. 7, p. 839–848, 2006. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33645230448&doi=10.1016%2fj.ress.2005.08.006&partnerID=40&md5=1225513512ecd219e3bf66e50fec3c70>>. Acesso em: 28 jun. 2019.

BERTRAND, J.; FRANSOO, J. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations and Production Management**, United Kingdom, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0036017726&doi=10.1108%2f01443570210414338&partnerID=40&md5=35c720c887511d1d1c2d59d155c23927>>. Acesso em: 28 maio 2019.

BHATTACHARYA, A.; SARKAR, B.; MUKHERJEE, S. Distance-based consensus method for abc analysis. **International Journal of Production Research**, United Kingdom, v. 45, n. 15, p. 3405–3420, 2007. ISSN 0020-7543. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-34250210784&doi=10.1080%2f00207540600847145&partnerID=40&md5=ac96635ecabb21ea98f7b6ad780b0985>>. Acesso em: 05 out. 2019.

BOTTER, R.; FORTUIN, L. Stocking strategy for service parts - a case study. **International Journal of Operations and Production Management**, United Kingdom, v. 20, n. 6, p. 656–674, 2000. ISSN 0144-3577. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-3543106200&doi=10.1108%2f01443570010321612&partnerID=40&md5=9e6f27da859a7700016ed0b3e2190487>>. Acesso em: 21 out. 2019.

BRAGLIA, M.; FROSOLINI, M. An integrated approach to implement project management information systems within the extended enterprise. **International Journal of Project Management**, United Kingdom, v. 32, n. 1, p. 18–29, 2014. ISSN 0263-7863. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84887245057&doi=10.1016%2fj.ijproman.2012.12.003&partnerID=40&md5=d34551e0672616bde66458e03dc3d7c1>>. Acesso em: 21 out. 2019.

BRAGLIA, M.; GRASSI, A.; MONTANARI, R. Multi-attribute classification method for spare parts inventory management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, United Kingdom, v. 10, n. 1, p. 55–65, 2004. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-2342527340&doi=10.1108%2f13552510410526875&partnerID=40&md5=56aa7ef8a847216f876002432f1617aa>>. Acesso em: 23 jul. 2019.

BRANS, J. P.; VINCKE, P. A preference ranking organisation method: (the promethee method for multiple criteria decision-making). **Management Science**, INFORMS, United States, v. 31, n. 6, p.

647–656, 1985. ISSN 00251909, 15265501. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2631441>>. Acesso em: 9 Maio 2020.

BROADUS, R. Toward a definition of "bibliometrics". **Scientometrics**, Hungary, v. 12, n. 5-6, p. 373–379, 1987. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0009300140&doi=10.1007%2fBF02016680&partnerID=40&md5=60af3536cc32b08e2659fc49c7eb9808>>. Acesso em: 23 out. 2019.

BROWN, S.; MAY, I. L. Risk-based hazardous release protection and prevention by inspection and maintenance. **Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME**, United States, v. 122, n. 3, p. 362–367, 2000. ISSN 0094-9930. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0034248763&doi=10.1115%2f1.556193&partnerID=40&md5=5096f64691a4d224ea5ff491f7b184af>>. Acesso em: 5 fev. 2020.

BUCKLEY, J. Fuzzy hierarchical analysis. **Fuzzy Sets and Systems**, Netherlands, v. 17, n. 3, p. 233–247, 1985. ISSN 1872-6801. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-46549093655&doi=10.1016%2f0165-0114%2885%2990090-9&partnerID=40&md5=6803ac3c3661a4b9eefc81615a39cef2>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

BUKSH, Z. A. et al. Network level bridges maintenance planning using multi-attribute utility theory. **Structure and Infrastructure Engineering**, United Kingdom, v. 15, n. 7, p. 872–885, 2019. ISSN 1573-2479. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041002285&doi=10.1080%2f15732479.2017.1414858&partnerID=40&md5=63b1169a869d3a213a3957b7cb6ee4e4>>. Acesso em: 11 Mar. 2020.

CHAN, F. et al. Implementation of total productive maintenance: a case study. **International Journal of Production Economics**, Netherlands, v. 95, n. 1, p. 71–94, 2005. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-10444282169&doi=10.1016%2fj.ijpe.2003.10.021&partnerID=40&md5=bd196bdc95fb539e3dc81d97afdd8c80>>. Acesso em: 18 dez. 2019.

CHAN, F.; PRAKASH, A. Maintenance policy selection in manufacturing firms using the fuzzy mcdm approach. **International Journal of Production Research**, United Kingdom, v. 50, n. 23, p. 7044–7056, 2012. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84868524824&doi=10.1080%2f00207543.2011.653451&partnerID=40&md5=4682b9641a1af67e453bf475e6a731e4>>. Acesso em: 18 dez. 2019.

CHANG, D.-Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy ahp. **European Journal of Operational Research**, Netherlands, v. 95, n. 3, p. 649–655, 1996. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0000672127&doi=10.1016%2f0377-2217%2895%2900300-2&partnerID=40&md5=9db7ff4e7c3049b02f4803c4ae585074>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

CHEN, S.-J. J. et al. Fuzzy multiple attribute decision making methods. In: CHEN, S.; HWANG, C.; HWANG, F. (Ed.). **Fuzzy multiple attribute decision making**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1992, (Lecture Notes in Mathematics, v. 375). p. 289–486. ISBN 9780387549989. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=XYSKMQEACAAJ>>. Acesso em: 14 Mar. 2020.

CHENG, C.-H.; YANG, K.-L.; HWANG, C.-L. Evaluating attack helicopters by ahp based on linguistic variable weight. **European Journal of Operational Research**, Netherlands, v. 116, n. 2, p. 423–435, 1999. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0032688425&doi=10.1016%2fS0377-2217%2898%2900156-8&partnerID=40&md5=d3fca0faddf90aab2dad92958ec36c7>>. Acesso em: 20 out. 2019.

CHURCHMAN, C. W.; ACKOFF, R. L.; ARNOFF, E. L. **Introduction to operations research**. New York: Wiley, 1957. 645 p. (Wiley International Edition). ISBN 9780471157748. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=JGstAAAAIAAJ>>. Acesso em: 17 Maio 2019.

CINELLI, M.; COLES, S.; KIRWAN, K. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. **Ecological Indicators**, Netherlands, v. 46, p. 138–148, 2014. ISSN 1470-160X. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84903939756&doi=10.1016%2fj.ecolind.2014.06.011&partnerID=40&md5=970039f0ada4bfec970cd0e7a3417391>>. Acesso em: 27 set. 2019.

CLEDEN, D. **Managing project uncertainty**. 1. ed. Abingdon, United Kingdom: Routledge, 2017. v. 1. 146 p. ISBN 9781351920414. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=WGJBDgAAQBAJ>>. Acesso em: 20 Jan. 2020.

COBO, M. et al. Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, United States, v. 62, n. 7, p. 1382–1402, 2011. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79959372931&doi=10.1002%2fasi.21525&partnerID=40&md5=8daa3f91d4ed90726f63e94182117a65>>. Acesso em: 27 nov. 2018.

COELHO, L. G.; LANGE, L.; COELHO, H. Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods. **Waste Management and Research**, United Kingdom, v. 35, n. 1, p. 3–28, 2017. ISSN 0734-242X. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85008622441&doi=10.1177%2f0734242X16664024&partnerID=40&md5=da7e61b32bf25c2f7e642d79a95e6595>>. Acesso em: 3 Out. 2019.

CSUTORA, R.; BUCKLEY, J. Fuzzy hierarchical analysis: The lambda-max method. **Fuzzy Sets and Systems**, Netherlands, v. 120, n. 2, p. 181–195, 2001. ISSN 0165-0114. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0035897966&doi=10.1016%2fs0165-0114%2899%2900155-4&partnerID=40&md5=f2c78a6ddb540a8c45af0febdc5c3dc2>>. Acesso em: 29 abr. 2020.

DICKERSON, D. E.; ACKERMAN, P. J. Risk-based maintenance management of u.s. public school facilities. **Procedia Engineering**, Netherlands, v. 145, p. 685 – 692, 2016. ISSN 1877-7058. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816300741>>. Acesso em: 4 fev. 2020.

DILLON, J. L.; PERRY, C. Multiattribute Utility Theory, Multiple Objectives And Uncertainty In Ex Ante Project Evaluation. **Review of Marketing and Agricultural Economics**, Australia, v. 45, n. 01-2, p. 1–25, March 1977. ISSN 0034-6616. Disponível em: <<https://ideas.repec.org/a/ags/remaae/9180.html>>. Acesso em: 21 out. 2019.

DONADEL, C. M. **Gerenciamento dos estoques para manutenção corretiva na TBG: um estudo de caso**. 109 f. Dissertação (Tese de mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Brasil, Florianópolis, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/93540>>. Acesso em: 21 Fev. 2020.

DONG, C. Assessment of mechanical engineering final year projects using fuzzy multi attribute utility theory. **Research and Development in Higher Education: Connections in Higher Education**, HERDSA, Australia, v. 35, n. 1, p. 23–30, 2012. ISSN 0155-6223. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/20.500.11937/36977>>. Acesso em: 19 set. 2019.

DONG, Y.; FRANGOPOL, D.; SABATINO, S. Optimizing bridge network retrofit planning based on cost-benefit evaluation and multi-attribute utility associated with sustainability. **Earthquake Spectra**, United States, v. 31, n. 4, p. 2255–2280, 2015. ISSN 8755-2930. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84964078837&doi=10.1193%2f012214EQS015M&partnerID=40&md5=f4313b9070db26db9f4c4f37948b5d00>>. Acesso em: 6 mar. 2020.

DOUMPOS, M.; ZOPOUNIDIS, C. **Multicriteria Analysis in Finance**. 1. ed. United States: Springer International Publishing, 2014. v. 8. 109 p. (SpringerBriefs in Operations Research, v. 8). ISBN 9783319058641. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=NX1WAAQBAJ>>. Acesso em: 23 Set. 2019.

DUBOIS, D.; PRADE, H. Systems of linear fuzzy constraints. **Fuzzy Sets and Systems**, Netherlands, v. 3, n. 1, p. 37–48, 1980. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0002448681&doi=10.1016%2f0165-0114%2880%2990004-4&partnerID=40&md5=13aa3d6a427c4123e76891e9e62fd480>>. Acesso em: 14 mar. 2020.

DUNN, S. The fourth generation of maintenance. In: **Proceedings of the International Conference of Maintenance Societies**. Perth, Australia: The Plant Maintenance Resource Center, 2003. p. 1–11. Disponível em: <http://www.plant-maintenance.com/articles/4th_Generation_Maintenance.pdf>. Acesso em: 2 Fev. 2020.

DURAN, O. Spare parts criticality analysis using a fuzzy ahp approach [analiza kritičnosti rezervnih dijelova primjenom pristupa neizrazitog analitičkog hijerarhijskog proces]. **Tehnicki Vjesnik**, Croatia, v. 22, n. 4, p. 899–905, 2015. ISSN 1330-3651. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938835871&doi=10.17559%2fTV-20140507002318&partnerID=40&md5=0975ef5c621303f5594534c89020f879>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

EGILMEZ, G.; GUMUS, S.; KUCUKVAR, M. Environmental sustainability benchmarking of the u.s. and canada metropolises: An expert judgment-based multi-criteria decision making approach. **Cities**, United Kingdom, v. 42, p. 31 – 41, 2015. ISSN 0264-2751. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275114001528>>. Acesso em: 28 fev. 2020.

EROL, I.; SENCER, S.; SARI, R. A new fuzzy multi-criteria framework for measuring sustainability performance of a supply chain. **Ecological Economics**, Netherlands, v. 70, n. 6, p. 1088–1100, 2011. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79953733850&doi=10.1016%2fj.ecolecon.2011.01.001&partnerID=40&md5=779690ad1ab71c4ed3c64d8b954a4d73>>. Acesso em: 10 maio 2020.

ETI, M.; OGAJI, S.; PROBERT, S. Reducing the cost of preventive maintenance (pm) through adopting a proactive reliability-focused culture. **Applied Energy**, United Kingdom, v. 83, n. 11, p. 1235 – 1248, 2006. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261906000079>>. Acesso em: 10 jul. 2020.

FARIA, H. de; COSTA, J. G. S.; OLIVAS, J. L. M. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, United Kingdom, v. 46, p. 201 – 209, 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115001409>>. Acesso em: 30 jan. 2020.

FERREIRA, R.; ALMEIDA, A. de; CAVALCANTE, C. A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, United Kingdom, v. 94, n. 5, p. 905–912, 2009. ISSN 0951-8320. Disponível em:

<<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-60249094324&doi=10.1016%2fj.ress.2008.10.001&partnerID=40&md5=243214eacf5a58da44844af05b715f04>>. Acesso em: 25 mar. 2020.

FILIPPINI, R. Operations management research: Some reflections on evolution, models and empirical studies in om. **International Journal of Operations and Production Management**, United Kingdom, v. 17, n. 7, p. 655–670, 1997. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-3543119001&doi=10.1108%2f01443579710175583&partnerID=40&md5=524d06ff7a3710274b9a6660ba56b2c5>>. Acesso em: 10 jul. 2020.

FISHBURN, P. C. A survey of multiattribute/multicriterion evaluation theories. In: ZIONTS, S. (Ed.). **Multiple criteria problem solving**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1978. p. 181–224. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=lrruCAAQBAJ>>. Acesso em: 4 Out. 2019.

FLORES, B.; OLSON, D.; DORAI, V. Management of multicriteria inventory classification. **Mathematical and Computer Modelling**, United Kingdom, v. 16, n. 12, p. 71–82, 1992. ISSN 0895-7177. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-38249009814&doi=10.1016%2f0895-7177%2892%2990021-C&partnerID=40&md5=6793b45bbb041bd156a246d7be1b6395>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

FRANGOPOL, D.; LIU, M. Bridge network maintenance optimization using stochastic dynamic programming. **Journal of Structural Engineering**, United States, v. 133, n. 12, p. 1772–1782, 2007. ISSN 0733-9445. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-36248990084&doi=10.1061%2f%28ASCE%290733-9445%282007%29133%3a12%281772%29&partnerID=40&md5=e70fc0d66fecba3f42d501b1973d49f2>>. Acesso em: 4 fev. 2020.

FREITAS, L. V. de et al. Decision-making with multiple criteria using ahp and maut: an industrial application. **International European Journal of Science and Technology**, United Kingdom, v. 2, n. 9, p. 93–100, 2013. ISSN 2304-9693. Disponível em: <https://www.eijst.org.uk/images/frontImages/gallery/Vol._2_No._9/12.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2020.

FUENTES, F. F. E. **Metodologia para inovação da gestão de manutenção industrial**. 192 f. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88894>>. Acesso em: 15 Nov. 2019.

GAJPAL, P.; GANESH, L.; RAJENDRAN, C. Criticality analysis of spare parts using the analytic hierarchy process. **International Journal of Production Economics**, Netherlands, v. 35, n. 1-3, p. 293–297, 1994. ISSN 0925-5273. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0028443186&doi=10.1016%2f0925-5273%2894%2990095-7&partnerID=40&md5=8f3b1ec071f1d8090fcd9c611e012bca>>. Acesso em: 23 jul. 2019.

GARG, A.; DESHMUKH, S. Maintenance management: Literature review and directions. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, United Kingdom, v. 12, n. 3, p. 205–238, 2006. ISSN 1355-2511. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33746931196&doi=10.1108%2f13552510610685075&partnerID=40&md5=a4acab8ddb18ade4ad7de07e0f7c588e>>. Acesso em: 19 dez. 2019.

GE, Y. et al. An integrated logarithmic fuzzy preference programming based methodology for optimum maintenance strategies selection. **Applied Soft Computing Journal**, Netherlands, v. 60, p. 591–601, 2017. ISSN 1568-4946. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85026451488&doi=10.1016%2fj.asoc.2017.07.021&partnerID=40&md5=cf84f099fa2c3684ec41d2364523913e>>. Acesso em: 02 ago. 2019.

GOMES, C. F.; AUTRAN, L.; GOMES, M. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. 5. ed. São Paulo, Brasil: Editora Atlas S.A., 2014. v. 1. 400 p. (1, v. 1). ISBN 9788522467969.

GOMES, C. F.; YASIN, M.; LISBOA, J. A literature review of manufacturing performance measures and measurement in an organizational context: A framework and direction for future research. **Journal of Manufacturing Technology Management**, United Kingdom, v. 15, p. 511–530, 09 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/17410380410547906>>. Acesso em: 20 out. 2019.

GOOSSENS, A.; BASTEN, R. Exploring maintenance policy selection using the analytic hierarchy process; an application for naval ships. **Reliability Engineering and System Safety**, United Kingdom, v. 142, p. 31–41, 2015. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84929332879&doi=10.1016%2fj.ress.2015.04.014&partnerID=40&md5=b5ba3076d50679b6319bae8f3bb7af0f>>. Acesso em: 16 jan. 2020.

GÜNGÖR, Z.; SERHADLIOĞLU, G.; KESEN, S. E. A fuzzy ahp approach to personnel selection problem. **Applied Soft Computing Journal**, Netherlands, v. 9, n. 2, p. 641–646, 2009. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-58649093521&doi=10.1016%2fj.asoc.2008.09.003&partnerID=40&md5=18f9341207b7a28629b01006d696abd1>>. Acesso em: 17 maio 2019.

HART, C. **Doing a Literature Review: Releasing the Social Science Research Imagination**. Thousand Oaks, United States: SAGE Publications, 1998. 230 p. (Open university set book). ISBN 9780761959755. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=tc8LS6qa_KIC>. Acesso em: 01 jul. 2019.

HASHEMIAN, H.; BEAN, W. State-of-the-art predictive maintenance techniques. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, United States, v. 60, n. 10, p. 3480–3492, 2011. ISSN 0018-9456. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-80052823830&doi=10.1109%2fTIM.2009.2036347&partnerID=40&md5=266863a3bbad32f5df0a39de7a76288a>>. Acesso em: 27 fev. 2020.

HECKMANN, I.; COMES, T.; NICKEL, S. A critical review on supply chain risk - definition, measure and modeling. **Omega (United Kingdom)**, United Kingdom, v. 52, p. 119–132, 2015. ISSN 0305-0483. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84913558028&doi=10.1016%2fj.omega.2014.10.004&partnerID=40&md5=ed88681345f3167371e37732daba4e35>>. Acesso em: 21 set. 2019.

HU, Q. et al. Or in spare parts management: A review. **European Journal of Operational Research**, Netherlands, v. 266, n. 2, p. 395 – 414, 2018. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221717307014>>. Acesso em: 21 fev. 2020.

HUANG, I.; KEISLER, J.; LINKOV, I. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. **Science of the Total Environment**, Netherlands, v. 409, n. 19, p. 3578–3594, 2011. ISSN 1879-1026. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-80051801543&doi=10.1016%2fj.scitotenv.2011.06.022&partnerID=40&md5=d318e91237238091991c8368465526c6>>. Acesso em: 14 mar. 2020.

HWANG, C.-L.; YOON, K. Methods for multiple attribute decision making. In: _____. **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981. p. 58–191. ISBN 978-3-642-48318-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3>. Acesso em: 20 out. 2019.

IOANNIS, D.; NIKITAS, N. Application of analytic hierarchy process & topsis methodology on ships' maintenance strategies. In: **Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer**

Safety and Reliability Seminars. Journal of Polish Safety and Reliability Association, 2013. v. 4, n. 1, p. 1–7. Disponível em: <<http://jpsra.am.gdynia.pl/upload/SSARS2013PDF/VOL1/SSARS2013-DagkinisNikitakos.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2019.

ISMAEEL, M. **Performance based budget allocation model for water networks.** 230 p. Tese (Mestrado) — Concordia University, Montreal, Quebec, Agosto 2016. Disponível em: <<https://spectrum.library.concordia.ca/981481/>>. Acesso em: 11 Mar. 2020.

JARDINE, A.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, United Kingdom, v. 20, n. 7, p. 1483–1510, 2006. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33646534620&doi=10.1016%2fj.ymssp.2005.09.012&partnerID=40&md5=913001285bc47fdf969017b0e11722c9>>. Acesso em: 19 nov. 2018.

JARDINE, A.; TSANG, A. **Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications.** 2. ed. United Kingdom: Taylor & Francis, 2013. 364 p. (Mechanical Engineering). ISBN 9781466554856. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=6sgh7iIQxboC>>. Acesso em: 17 Ago 2019.

JOSHI, A. Comparison between scopus & isi web of science. **Journal Global Values**, India, v. 7, n. 1, p. 1–11, 2016. Disponível em: <<http://anubooks.com/wp-content/uploads/2017/08/2016-7-JVG-No.-1-1.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2020.

KAILIPONI, P. Analyzing evacuation decisions using multi-attribute utility theory (maut). **Procedia Engineering**, Netherlands, v. 3, p. 163 – 174, 2010. ISSN 1877-7058. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705810004856>>. Acesso em: 19 jan. 2020.

KANNAN, D. et al. Integrated fuzzy multi criteria decision making method and multiobjective programming approach for supplier selection and order allocation in a green supply chain. **Journal of Cleaner Production**, Netherlands, v. 47, p. 355–367, 2013. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84879921335&doi=10.1016%2fj.jclepro.2013.02.010&partnerID=40&md5=bee06f49c16dc29b5833102b332b2ea0>>. Acesso em: 14 mar. 2020.

KAPOOR, V.; TAK, S. Fuzzy application to the analytic hierarchy process for robot selection. **Fuzzy Optimization and Decision Making**, United States, v. 4, n. 3, p. 209–234, 2005. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-24144464328&doi=10.1007%2fs10700-005-1890-3&partnerID=40&md5=4d80b609fb46500ce6d4bcef862824bd>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica.** 4. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Qualitymark, 2012. 410 p. ISBN 9788541400404.

KEENEY, R.; RAIFFA, H. Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, United States, v. 9, n. 7, p. 403, 1979. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-70149089475&doi=10.1109%2fTSMC.1979.4310245&partnerID=40&md5=b1191c8d2287da5d465aacd8ca505be8>>. Acesso em: 20 set. 2019.

KHAN, F. I.; HADDARA, M. Risk-based maintenance (rbm): a new approach for process plant inspection and maintenance. **Process Safety Progress**, Wiley Online Library, United States, v. 23, n. 4, p. 252–265, 2004. ISSN 1547-5913. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002%2Fpr.10010>>. Acesso em: 4 fev. 2020.

KIKUCHI, S. Study of transportation and uncertainty. In: ATTOH-OKINE, N. O.; AYYUB, B. M. (Ed.). **Applied Research in Uncertainty Modeling and Analysis**. Boston, MA: Springer, 2005. v. 20, p. 303–319. ISBN 978-0-387-23550-9.

KILPI, J.; VEPSÄLÄINEN, A. Pooling of spare components between airlines. **Journal of Air Transport Management**, United Kingdom, v. 10, n. 2, p. 137–146, 2004. ISSN 0969-6997. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-1142305361&doi=10.1016%2fj.jairtraman.2003.09.001&partnerID=40&md5=2b9e7cd55d2c41809ac4f8a2aa34e053>>. Acesso em: 23 set. 2019.

KO, D.-G.; KIRSCH, L. J. The hybrid it project manager: One foot each in the it and business domains. **International Journal of Project Management**, United Kingdom, v. 35, n. 3, p. 307 – 319, 2017. ISSN 0263-7863. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263786317300741>>. Acesso em: 3 out. 2019.

KRANENBURG, A.; HOUTUM, G. V. Service differentiation in spare parts inventory management. **Journal of the Operational Research Society**, United Kingdom, v. 59, n. 7, p. 946–955, 2008. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-44849140377&doi=10.1057%2fopalgrave.jors.2602414&partnerID=40&md5=3872d4b4b01e31c77f8715a45e28ab56>>. Acesso em: 16 abr. 2020.

KUBLER, S. et al. A state-of the-art survey testbed of fuzzy ahp (fahp) applications. **Expert Systems with Applications**, United Kingdom, v. 65, p. 398 – 422, 2016. ISSN 0957-4174. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417416304638>>. Acesso em: 16 jan. 2020.

LAARHOVEN, P. van; PEDRYCZ, W. A fuzzy extension of saaty's priority theory. **Fuzzy Sets and Systems**, Netherlands, v. 11, n. 1-3, p. 229–241, 1983. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0020843523&doi=10.1016%2fS0165-0114%2883%2980082-7&partnerID=40&md5=6ee97b1ce9f080d70e556e9f92d3c197>>. Acesso em: 21 out. 2019.

ŁUKASIEWICZ, J. **Elementy logiki matematycznej: skrypt autoryzowany**. Warszawa: nakł. Komisji Wydawniczej Koła Matematyczno-Fizycznego Słuchaczy Uniwersytetu Warszawskiego, 1929. v. 18. (Wydawnictwa Koła Matematyczno-Fizycznego Słuchaczy Uniwersytetu Józefa Piłsudskiego w Warszawie, v. 18). Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=4Zr_zAEACAAJ>. Acesso em: 16 Set. 2019.

MARDANI, A. et al. Application of multiple criteria decision making techniques in tourism and hospitality industry: A systematic review. **Transformations in Business and Economics**, Lithuania, v. 15, n. 1, p. 192–213, 2016. ISSN 1648-4460. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84969812968&partnerID=40&md5=bd14a77a55193187040d3630f7028a96>>. Acesso em: 26 jul. 2019.

MARSEGUERRA, M.; ZIO, E. Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and monte carlo simulation. **Reliability Engineering and System Safety**, United Kingdom, v. 68, n. 1, p. 69–83, 2000. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0033905057&doi=10.1016%2fS0951-8320%2800%2900007-7&partnerID=40&md5=8b97e523bff5b192c8b7e937151d129a>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

MIKHAILOV, L. Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements. **Fuzzy Sets and Systems**, Netherlands, v. 134, n. 3, p. 365–385, 2003. ISSN 0165-0114. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0037448851&doi=10.1016%2fS0165-0114%2802%2900383-4&partnerID=40&md5=b8f352bdcbc2e971aeb666462a9a485f>>. Acesso em: 01 mar. 2020.

MIN, H. International supplier selection: A multi-attribute utility approach. **International Journal of Physical Distribution Logistics Management**, United Kingdom, v. 24, n. 5, p. 24–33, 1994. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84949403878&doi=10.1108%2f09600039410064008&partnerID=40&md5=0a42554134c18e7763982ac026e89a42>>. Acesso em: 21 out. 2019.

MOLENAERS, A. et al. Criticality classification of spare parts: a case study. **International Journal of Production Economics**, Netherlands, v. 140, n. 2, p. 570–578, 2012. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84866734156&doi=10.1016%2fj.ijpe.2011.08.013&partnerID=40&md5=1550199e88203cee630832540d70bcd1>>. Acesso em: 21 fev. 2020.

MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. The journal coverage of web of science and scopus: a comparative analysis. **Scientometrics**, Hungary, v. 106, n. 1, p. 213–228, 2016. ISSN 0138-9130. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84954384742&doi=10.1007%2fs11192-015-1765-5&partnerID=40&md5=802822ab7413ead837612d582d255369>>. Acesso em: 23 ago 2019.

MORABITO, R. et al. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier Editora Ltda., 2018. ISBN 9788535291353. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=JO1oDwAAQBAJ>>. Acesso em: 4 Fev. 2019.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered Maintenance**. 2. ed. United States: Industrial Press, 2001. ISBN 9780831131463. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=bNCVF0B7vpIC>>. Acesso em: 1 Ago. 2019.

MURTHY, D.; ATRENS, A.; ECCLESTON, J. Strategic maintenance management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, United Kingdom, v. 8, n. 4, p. 287–305, 2002. ISSN 1355-2511. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0036434366&doi=10.1108%2f13552510210448504&partnerID=40&md5=bc1f155b649e2b01c3ebbe794a0b5987>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

MYLLYVIITA, T. et al. Sustainability assessment of wood-based bioenergy - a methodological framework and a case-study. **Biomass and Bioenergy**, United Kingdom, v. 59, p. 293–299, 2013. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84889597692&doi=10.1016%2fj.biombioe.2013.07.010&partnerID=40&md5=86472a15ff233855acdf5641d628d8d9>>. Acesso em: 12 nov. 2019.

OLIVEIRA, F.; VAZ, C. B. Spare parts inventory management using quantitative and qualitative classification. In: AMORIM, M. et al. (Ed.). **Engineering Systems and Networks**. United States: Springer International Publishing, 2016. p. 233–241. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=8LK\ _DQAAQBAJ>. Acesso em: 16 Ago. 2019.

ONAR, S. Çevik et al. A new hesitant fuzzy qfd approach: an application to computer workstation selection. **Applied Soft Computing Journal**, Netherlands, v. 46, p. 1–16, 2016. ISSN 1568-4946. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84965105607&doi=10.1016%2fj.asoc.2016.04.023&partnerID=40&md5=ed68c7f4c7379629fa058cad40a2952d>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

OTAL, B.; ALONSO, L.; VERIKOUKIS, C. Highly reliable energy-saving mac for wireless body sensor networks in healthcare systems. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, United States, v. 27, n. 4, p. 553–565, 2009. ISSN 0733-8716. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-67349126471&doi=10.1109%2fJSAC.2009.090516&partnerID=40&md5=f3a910cba9e01e109a08c53b9882eb1e>>. Acesso em: 31 jul. 2019.

- POHEKAR, S.; RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, United Kingdom, v. 8, n. 4, p. 365–381, 2004. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-1542274590&doi=10.1016%2fj.rser.2003.12.007&partnerID=40&md5=5c6a34ae3927694c86b49c8bfdb08387>>. Acesso em: 30 set. 2019.
- POKORNY, B.; ADAMS, M. What do criteria and indicators assess? an analysis of five c&i sets relevant for forest management in the brazilian amazon. **The International Forestry Review**, Commonwealth Forestry Association, United Kingdom, v. 5, n. 1, p. 20–28, 2003. ISSN 14655489, 20537778. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/43739298>>. Acesso em: 30 set. 2019.
- PUJADAS, P. et al. Mives multi-criteria approach for the evaluation, prioritization, and selection of public investment projects. a case study in the city of barcelona. **Land Use Policy**, United Kingdom, v. 64, p. 29–37, 2017. ISSN 0264-8377. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85013967639&doi=10.1016%2fj.landusepol.2017.02.014&partnerID=40&md5=1bbab0a9cbc4aa7ee68b5bf64e8664e3>>. Acesso em: 11 mar. 2020.
- RAUSAND, M.; VATN, J. Reliability centred maintenance. In: KOBACZY, K. A. H.; MURTHY, D. N. P. (Ed.). **Complex system maintenance handbook**. Londres, United Kingdom: Springer, 2008. p. 79–108. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=zh_cGGC1TtEC>. Acesso em: 22 Dez. 2019.
- REBAI, S.; AZAIEZ, M.; SAIDANE, D. A multi-attribute utility model for generating a sustainability index in the banking sector. **Journal of Cleaner Production**, Netherlands, v. 113, p. 835–849, 2016. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84949639094&doi=10.1016%2fj.jclepro.2015.10.129&partnerID=40&md5=1a6df46d77b785a46884cb81fce6c43c>>. Acesso em: 6 mar. 2020.
- RIABACKE, M.; DANIELSON, M.; EKENBERG, L. State-of-the-art prescriptive criteria weight elicitation. **Advances in Decision Sciences**, United States, v. 2012, 2012. ISSN 2090-3367. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84872819349&doi=10.1155%2f2012%2f276584&partnerID=40&md5=e2d3d602b929641e611cf2dbf4b13197>>. Acesso em: 03 out. 2019.
- ROY, B. The outranking approach and the foundations of electre methods. In: COSTA, C. A. Bana e (Ed.). **Readings in Multiple Criteria Decision Aid**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990. p. 155–183. ISBN 978-3-642-75935-2.
- ROY, B. Paradigms and challenges. In: GRECO, S. (Ed.). **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. New York, NY: Springer, 2005. p. 3–24. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.136.9170&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 1 Mar. 2020.
- ROYCHOWDHURY, S.; PEDRYCZ, W. A survey of defuzzification strategies. **International Journal of Intelligent Systems**, United States, v. 16, n. 6, p. 679–695, 2001. ISSN 0884-8173. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0035371137&doi=10.1002%2fint.1030&partnerID=40&md5=8fac9bed00a5d124ec1acfc74b5166bd>>. Acesso em: 21 out. 2019.
- SAATY, T. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, United States, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1977. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-49449122896&doi=10.1016%2f0022-2496%2877%2990033-5&partnerID=40&md5=8412d6f0fbf8fe2718e30d7aa40286b6>>. Acesso em: 20 out. 2019.

SAATY, T. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0025700933&doi=10.1016%2f0377-2217%2890%2990057-I&partnerID=40&md5=9f8c2396a5a428780b812877058cdf07>>. Acesso em: 20 out. 2019.

SAATY, T.; KEARNS, K.; RODIN, E. **Analytical Planning: The Organization of System**. 1. ed. United Kingdom: Elsevier Science, 2014. v. 7. (Advances in Water Pollution Control, v. 7). ISBN 9781483153964. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=fHfBQAAQBAJ>>. Acesso em: 29 Jan. 2019.

SAATY, T.; PENIWATI, K. **Group Decision Making: Drawing Out and Reconciling Differences**. 1. ed. Pittsburgh, PA: RWS Publications, 2013. 385 p. ISBN 9781888603224. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=rGwXAgAAQBAJ>>. Acesso em: 30 Jul. 2019.

SAATY, T. L. **Decision making with dependence and feedback: The analytic network process**. 2. ed. United States: RWS Publications, 1996. v. 4922. (Analytic hierarchy process series, v. 4922). ISBN 9780962031793. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=MGpaAAAAYAAJ>>. Acesso em: 12 Out. 2019.

SALONEN, A.; DELERYD, M. Cost of poor maintenance: a concept for maintenance performance improvement. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, Eskilstuna, Sweden, v. 17, n. 1, p. 63–73, 2011. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79953863419&doi=10.1108%2f1355251111116259&partnerID=40&md5=23f537a2f8446613f458a78c7cad39a5>>. Acesso em: 20 dez. 2019.

SENGUPTA, I. Bibliometrics, informetrics, scientometrics and librametrics: An overview. **Libri**, Germany, v. 42, n. 2, p. 75–98, 1992. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0002051924&doi=10.1515%2f1ibr.1992.42.2.75&partnerID=40&md5=7e41c530603c42d7850a6027fa8e79ab>>. Acesso em: 16 set. 2018.

SEO, F. Basic concepts in derivation of fuzzy multiattribute utility functions. In: FANDEL, G.; GAL, T. (Ed.). **Multiple Criteria Decision Making**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. p. 403–412. ISBN 978-3-642-59132-7. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-59132-7_44>. Acesso em: 1 Jun. 2020.

SHAHIN, A.; ATTARPOUR, M. Developing decision making grid for maintenance policy making based on estimated range of overall equipment effectiveness. **Modern Applied Science**, Canada, v. 5, n. 6, p. 86–97, 2011. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84856262721&doi=10.5539%2fmas.v5n6p86&partnerID=40&md5=b639e2d96482db83619b4a662efee499>>. Acesso em: 2 fev. 2020.

SHAHIN, A.; SHIROUYEHZAD, H.; POURJAVAD, E. Optimum maintenance strategy: A case study in the mining industry. **International Journal of Services and Operations Management**, United Kingdom, v. 12, n. 3, p. 368–386, 2012. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84863694805&doi=10.1504%2fIJSOM.2012.047626&partnerID=40&md5=65cff81e7d052fcf99753433b0c7214b>>. Acesso em: 20 out. 2019.

SIMÕES, M.; SHAW, I. **Controle e modelagem fuzzy**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2007. ISBN 9788521215479. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=PEe1DwAAQBAJ>>. Acesso em: 5 Jan. 2020.

SLACK, P.; BRANDON-JONES, P. **Operations and Process Management: Principles and Practice for Strategic Impact**. 5. ed. United Kingdom: Pearson Education Limited, 2018. ISBN 9781292176178. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=OPJFDwAAQBAJ>>. Acesso em: 21 Fev. 2020.

SÖRQVIST, L. **Poor quality costing**. 186 p. Tese (Doutorado) — KTH, Materials Processing, 1998. QC 20100823. Disponível em: <<http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A8274&dswid=-3775>>. Acesso em: 21 Jan. 2020.

SUN, B. **Operational decision making for medical clinics through the use of simulation and multi-attribute utility theory**. 98 f. Tese (Doutorado) — University of Louisville, United States, 2016. Disponível em: <<https://ir.library.louisville.edu/etd/2452>>. Acesso em: 11 Mar. 2020.

TEIXEIRA, C.; LOPES, I.; FIGUEIREDO, M. Classification methodology for spare parts management combining maintenance and logistics perspectives. **Journal of Management Analytics**, United Kingdom, v. 5, n. 2, p. 116–135, 2018. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85053554608&doi=10.1080%2f23270012.2018.1436989&partnerID=40&md5=5d84752ac4e3919182f4c04cd0cd2731>>. Acesso em: 21 fev. 2020.

THOMÉ, A.; SCAVARDA, L.; SCAVARDA, A. Conducting systematic literature review in operations management. **Production Planning and Control**, United Kingdom, v. 27, n. 5, p. 408–420, 2016. ISSN 0953-7287. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84956874469&doi=10.1080%2f09537287.2015.1129464&partnerID=40&md5=c546f4f29390f7fdda3814561dfb39c8>>. Acesso em: 29 dez. 2019.

TING, P.-K. et al. Product and process cost estimation with fuzzy multi-attribute utility theory. **Engineering Economist**, United States, v. 44, n. 4, p. 303–331, 1999. ISSN 0013-791X. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0001087897&doi=10.1080%2f00137919908967526&partnerID=40&md5=a2f949545629d73db98a201c8000368e>>. Acesso em: 19 jan. 2020.

TRANTAPHYLLOU, E. Multi-criteria decision making methods. In: TRIANTAPHYLLOU, E. (Ed.). **Multi-criteria decision making methods: A comparative study**. Boston, MA: Springer US, 2013. v. 44, p. 5–21. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=IPPiBwAAQBAJ>>. Acesso em: 18 Mar. 2020.

TRANTAPHYLLOU, E. et al. Determining the most important criteria in maintenance decision making. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, United Kingdom, v. 3, n. 1, p. 16–28, 1997. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0030649068&doi=10.1108%2f13552519710161517&partnerID=40&md5=c6cfda4517d002e4eb7467e3dc6f5bf5>>. Acesso em: 26 jul. 2019.

VISSER, J. Modelling maintenance performance: a practical approach. In: **IMA conference**. Edinburgh: [s.n.], 1998. p. 1–13.

WANG, J. et al. Comparison of one-level minimally invasive and open transforaminal lumbar interbody fusion in degenerative and isthmic spondylolisthesis grades 1 and 2. **European Spine Journal**, Germany, v. 19, n. 10, p. 1780–1784, 2010. ISSN 0940-6719. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-78349304254&doi=10.1007%2fs00586-010-1404-z&partnerID=40&md5=31ba39bce4776d8f6cd93d987e45990d>>. Acesso em: 30 dez. 2019.

WANG, W. A stochastic model for joint spare parts inventory and planned maintenance optimisation. **European Journal of Operational Research**, Netherlands, v. 216, n. 1, p. 127–139, 2012. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-80052718912&doi=10.1016%2fj.ejor.2011.07.031&partnerID=40&md5=d652df203bd93e510f3d2348712d9cef>>. Acesso em: 26 jun. 2019.

WANG, X.; TRIANTAPHYLLOU, E. Ranking irregularities when evaluating alternatives by using some electre methods. **Omega**, United Kingdom, v. 36, n. 1, p. 45–63, 2008. Disponível em:

<<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-34247194905&doi=10.1016%2fj.omega.2005.12.003&partnerID=40&md5=394260c7f31c8f9f754b7334e9d6f855>>. Acesso em: 26 jul. 2019.

WANG, Y. et al. Selecting a cruise port of call location using the fuzzy-ahp method: A case study in east asia. **Tourism Management**, United Kingdom, v. 42, p. 262–270, 2014. ISSN 0261-5177. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84892660226&doi=10.1016%2fj.tourman.2013.11.005&partnerID=40&md5=bda1ef209935e6e2ce53231ad0853ddb>>. Acesso em: 16 jan. 2020.

WANKE, P. **Gestão de estoques na cadeia de suprimento: decisões e modelos quantitativos**. 3. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2011. (Coleção Coppead de administração). ISBN 9788522462155. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=fB7zZwEACAAJ>>. Acesso em: 22 Fev. 2020.

WRIGHT, G.; GOODWIN, P. Decision making and planning under low levels of predictability: Enhancing the scenario method. **International Journal of Forecasting**, Netherlands, v. 25, n. 4, p. 813–825, 2009. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-70349947934&doi=10.1016%2fj.ijforecast.2009.05.019&partnerID=40&md5=ef175e164d26b4b4ad56015cd54131e2>>. Acesso em: 26 jun. 2019.

WU, M.-C.; HSU, Y.-K. Design of bom configuration for reducing spare parts logistic costs. **Expert Systems with Applications**, United Kingdom, v. 34, n. 4, p. 2417–2423, 2008. ISSN 0957-4174. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-38649105764&doi=10.1016%2fj.eswa.2007.04.001&partnerID=40&md5=0ed95ee0253b5a50640ac83e667e8846>>. Acesso em: 21 out. 2019.

XAVIER, J. N. **Manutenção—tipos e tendências: Relatório técnico tecém**. Brasil, Belo Horizonte, 2005. v. 24, 4 p. Disponível em: <<http://claudemir Alves.weebly.com/uploads/3/8/6/2/3862918/tendencia.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2019.

YE, Q.; SONG, H.; LI, T. Cross-institutional collaboration networks in tourism and hospitality research. **Tourism Management Perspectives**, Netherlands, v. 2-3, p. 55–64, 2012. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84861323546&doi=10.1016%2fj.tmp.2012.03.002&partnerID=40&md5=d5708f0c47a4bfa91a4c794b0e7f>>. Acesso em: 27 set. 2019.

YU, L.; YANG, Z.; TANG, L. Prediction-based multi-objective optimization for oil purchasing and distribution with the nsga-ii algorithm. **International Journal of Information Technology and Decision Making**, Singapore, v. 15, n. 2, p. 423–451, 2016. ISSN 0219-6220. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84960477892&doi=10.1142%2fS0219622016500097&partnerID=40&md5=2f43f46203771f0f513874169a075c16>>. Acesso em: 10 maio 2020.

YUEN, K. Membership maximization prioritization methods for fuzzy analytic hierarchy process. **Fuzzy Optimization and Decision Making**, United States, v. 11, n. 2, p. 113–133, 2012. ISSN 1573-2908. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84861099378&doi=10.1007%2fs10700-012-9119-8&partnerID=40&md5=ad2ff64491ad0e643abccd0ccd192c54>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

ZADEH, L. Fuzzy sets. **Information and Control**, United States, v. 8, n. 3, p. 338 – 353, 1965. ISSN 0019-9958. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X>>. Acesso em: 21 nov. 2019.

ZADEH, L. Quantitative fuzzy semantics. **Information Sciences**, United States, v. 3, n. 2, p. 159–176, 1971. ISSN 0020-0255. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0001025990&doi=10.1016%2fS0020-0255%2871%2980004-X&partnerID=40&md5=ddf96a1692a7263ca0b53d8a6f99be08>>. Acesso em: 21 out. 2019.

ZADEH, L. A fuzzy-algorithmic approach to the definition of complex or imprecise concepts. **International Journal of Man-Machine Studies**, United Kingdom, v. 8, n. 3, p. 249–291, 1976. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0016949867&doi=10.1016%2fS0020-7373%2876%2980001-6&partnerID=40&md5=e97d24215a22b69b7c06c3c44ea61ad2>>. Acesso em: 21 out. 2019.

ZENG, Y.-R.; WANG, L.; HE, J. A novel approach for evaluating control criticality of spare parts using fuzzy comprehensive evaluation and gra. **International Journal of Fuzzy Systems**, Germany, v. 14, n. 3, p. 392–401, 2012. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84871759396&partnerID=40&md5=58fa675635e2d1af924158c945ca6abf>>. Acesso em: 21 out. 2019.

ZHü, K. Fuzzy analytic hierarchy process: Fallacy of the popular methods. **European Journal of Operational Research**, Netherlands, v. 236, n. 1, p. 209–217, 2014. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84900618804&doi=10.1016%2fj.ejor.2013.10.034&partnerID=40&md5=e76950fccba5e8a08a872fdc37b68131>>. Acesso em: 6 mar. 2020.

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**, United States, v. 18, n. 3, p. 429–472, 2015. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84930985235&doi=10.1177%2f1094428114562629&partnerID=40&md5=7b7c6309c7eaf4a503fe921cf96c4bb3>>. Acesso em: 26 dez. 2019.